INVESTIGACION y CIENCIA

EL EXTRAÑO MUNDO DE LA FISICA CUANTICA

PROGRAMAS DE ORDENADOR ADAPTATIVOS

ESCOLLOS DE LA TEORIA ECONOMICA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



HABILIDADES REPRODUCTIVAS DE LAS RANAS

SEPTIEMBRE 1992
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Septiembre de 1992 Número 192



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Josefa Enamorado: *Los últimos fabricantes de hachas de piedra;* José Vidal Gancedo: *Formación de cristales moleculares*; Luis Bou: *Algoritmos genéticos* y *Juegos matemáticos;* Ana Mª García: *Pruebas de aliento en medicina;* Joandomènec Ros: *Estrategias reproductoras de las ranas;* Patricia García-Durán Huet: *Las bases de la teoría económica*; Ramón Pascual: *Filosofía cuántica;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Adrados, Josep-Enric Llebot y Antonio Celada

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Fernando Muñoz Box, Antonio Prevosti y Santiago Mas-Coma

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Christopher Burke, Quesada/Burke
8	Giancarlo Ligabue (arriba), Patricia J. Wynne (*abajo*)
9	Nicholas Toth (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
10	Viviano Domenici
13	Joseph C. Calabrese y John J. Christy, Du Pont
14	Joseph C. Calabrese y John J. Christy (*izquierda*), Jared Schneidman (*centro a la derecha*)
15	Layne Kennedy
16	Jared Schneidman; Joseph C. Calabrese y John J. Christy (*recuadro*)
17	Layne Kennedy
18	Joseph C. Calabrese y John J. Christy (*izquierda*), Jared Schneidman (*derecha*)
20-23	Ian Worpole
24	Gabor Kiss
25	Ian Worpole
26	Johnny Johnson
27	Ian Worpole
39	Gordon Lansburg, Bruce Coleman, Inc.
40	Laurie Grace (*izquierda*), David Dressler y Huntington Potter, Escuela de Medicina de Harvard (*derecha.*)
41	Laurie Grace; Patricia J. Wynne (*recuadro*)
42	Laurie Grace
43	Laurie Grace (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
44	General Electric Corporation
47	Dan Wagner
48	Archivo Bettmann (*arriba*), Laurie Grace (*abajo*)
49-50	Laurie Grace
51	Johnny Johnson
54-55	Juan M. Reijh, Animals/Animals
56-57	Patricia J. Wynne
58	Carol Hughes, Bruce Coleman, Inc. (*arriba a la izquierda*), Michael Fogden, Animals/Animals (*arriba a la derecha*), Michael Fogden, Bruce Coleman, Inc. (*abajo*)
59	Michael Fogden, Bruce Coleman, Inc. (*arriba y abajo*)
60-61	Patricia J. Wynne
65-67	Documentos Pour La Science
68	Pour La Science, P. Horber (*arriba*), Documentos Pour La Science (*abajo*)
70-71	Andew Christie
72-75	Boris Starosta
76	Robert Prochnow
78	John Pinderhughes
84-85	Johnny Johnson
88-91	Documentos Pour La Science



LA RANA DE LA PORTADA, perteneciente a la especie *Discoglossus pictus*, sapillo pintojo, asegura la pervivencia de sus huevos portándolos consigo a la espalda. No es más que una de las muchas y variadas formas que han encontrado estos anfibios de hacer frente a las dificultades que amenazan su reproducción (véase "Estategias reproductoras de las ranas", de William E. Duellman). Su colonización de la totalidad del planeta es buena prueba del éxito conseguido. (Fotografía: Xavier Moreno Mateo)

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

«Hasta hace poco, afirmar que la nebulosa de Orión estuviera compuesta en parte de hierro se hubiera calificado de increíble, cuando no de absurdo. Ahora, Wyse ha observado de manera cierta 10 rayas prohibidas de Fe II y unas 15 de Fe III, sin que haya lugar para otras conjeturas. A la par, todo rastro de sorpresa ha quedado eliminado ante el descubrimiento, aún más extraordinario, de la presencia de átomos de hierro, tenuemente distribuidos, en el gas que llena todo el espacio interestelar. Año tras año, impresiona cada vez más la uniformidad general de la materia en todas las regiones del espacio accesibles a nuestra observación.»

«Aunque los microscopios de barrido de poder separador bajo (hasta una micra) se han construido dotados incluso con observación directa de la imagen en la pantalla de un cinescopio, los instrumentos de mayor poder separador requieren un procedimiento más lento de formación de la imagen. Una solución satisfactoria ha resultado ser un receptor de facsímil, que produce una imagen en ocho minutos (frente a 1/30 de segundo en los receptores de televisión).»

«Hay muchas personas que sangran excesivamente con heridas leves, porque su sangre es escasa en principio coagulante (protrombina). Hasta ahora no se conocía un procedimiento satisfactorio para contener sus hemorragias, de modo que hasta una extracción dental representaba un riesgo grave para ellas. La nueva globulina coagulante aporta el componente del que es deficitaria la sangre de los "hemofílicos" y pone en manos de las profesiones médica y odontológica un medio eficaz para detener la sangría de las heridas leves en pocos segundos.»

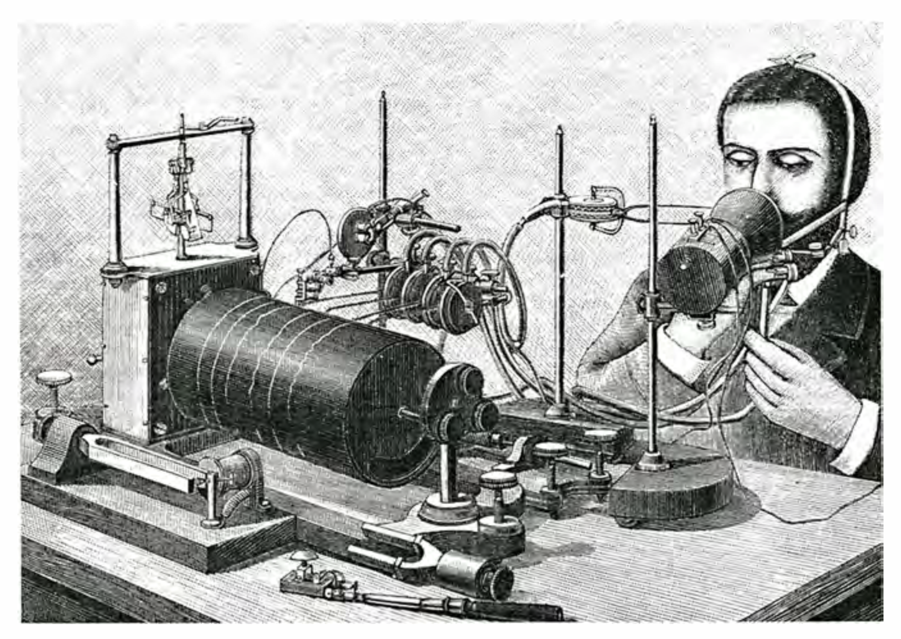
«Una curiosa sensación, una especie de 'vértigo', experimentada a veces por los pilotos la ha descrito recientemente Harold G. Cowley, de la Comisión de Aeronáutica Civil estadounidense. Las circunstancias de su aparición son como sigue. Durante un vuelo instrumental, una leve inclinación del avión pasa desapercibida. Cuando termina por hacerse lo bastante acusada para que el piloto se percate, éste corrige la actitud del aparato en un lapso de tiempo mucho más corto que el que tardó en producirse el ladeo original. Ahora bien, el oído humano está constituido de tal modo que nota enseguida las aceleraciones rápidas pero no las lentas. Así el piloto acaba con la sensación de que el avión está basculando hacia el otro costado.»

... cien años

«Para comprobar la fuerza prensil de los niños muy pequeños, el doctor Louis Robinson colocaba sus dedos contra las palmas de aquéllos. El contacto provocaba en el acto el cierre de la mano, en apariencia por mero reflejo, pues daba casi igual que el niño estuviera dormido o despierto. Después levantaba los dedos, descubriendo para su asombro que el niño los sujetaba con más fuerza y se dejaba así izar desde la cama. En muchos casos, los recién nacidos se quedaban colgados y aguantaban tranquilamente su propio peso durante un minuto. En la mayoría de los casos, el niño no planteaba ninguna objeción al experimento. Estas habilidades no sirven para nada a las crías humanas. Parece así legítimo deducir que tan asombrosa fuerza prensil sea un vestigio de los hábitos merced a los cuales, en épocas pasadas, sus antepasados arbóreos se salvaban de perecer en la tierna infancia.»

«El hecho de que Nancy Hanks haya rebajado recientemente la marca de trote equino hasta 2 minutos y 5 1/4 segundos es una notable confirmación de una ley matemática que se ha cumplido a la fracción de segundo durante los últimos sesenta y dos años. Esa ley dice que el tiempo necesario para trotar una milla se reduce exactamente a razón de once veintiseisavos de segundo al año. A ese ritmo, en el año 2047 se conseguirá recorrer una milla por minuto y, 297 años después, podrán montarse trotones a la velocidad del rayo.»

«Abbot Rousselot, ha conseguido montar el dispositivo necesario para registrar, uno a uno, los movimientos cuya reunión constituye una palabra o frase. Cada vez que el aire contenido en el tubo de goma se pone a vibrar, las vibraciones se comunican al aire del tambor, tras de lo cual la goma, la placa y la palanca se ponen en movimiento. Si a la vez gira el cilindro, la línea que sobre éste trace la punta de la palanca no será ya recta, sino una transcripción de las vibraciones. Así podrá analizarse la pronunciación de cualquier idioma, dialecto o variante lingüística, sin confiar en el testimonio del oído, que sólo distingue ligeras diferencias entre los modos de hablar de distintos individuos.»



Registrador fonético de Abbot Rousselot

Los últimos fabricantes de hachas de piedra

Un encuentro casual con los habitantes de las tierras altas de Nueva Guinea ha proporcionado a los arqueólogos una oportunidad inapreciable para crear un modelo de las técnicas prehistóricas

Nicholas Toth, Desmond Clark y Giancarlo Ligabue

Hace sólo 10.000 años, todas las sociedades humanas fabricaban y usaban utensilios de piedra. En los tiempos modernos, el avance implacable de técnicas más complejas apenas ha dejado vestigios de ese mundo primitivo y es casi seguro que éstos desaparecerán antes de que termine el presente siglo. Los antropólogos deben, pues, apresurarse para estudiar a los artesanos de la Edad de la Piedra que todavía subsisten, pues son ellos quienes pueden proporcionarnos pistas sobre nuestros primeros antepasados.

El estudio de los humanos modernos desde una perspectiva arqueológica corresponde a la etnoarqueología, que, por desdicha, es una disciplina reciente. Los investigadores del siglo pasado solían prestar más atención a los fabricantes británicos de piedras de fusil que a los talladores de piedra contemporáneos de las Américas, Africa del sur, Australia, Nueva Guinea y las Islas del Pacífico.

Para ayudar a compensar este desequilibrio, en 1990 visitamos a un grupo de horticultores del pueblo langda, en las montañas centrales de Irian Jaya, al oeste de Nueva Guinea. Estas gentes han venido fabricando hachas de piedra y comerciando con ellas, en un aislamiento casi total del mundo exterior, hasta 1984, año en que Gunter Konrad, urólogo alemán, y uno de nosotros (Ligabue) entramos en contacto con ellos durante una expedición por esta zona.

El establecimiento posterior de una misión cristiana y la implantación rápida de la economía monetaria comenzaron a transformar la cultura tradicional, por lo que el Ligabue Research and Study Center subvencionó la expedición con el propósito expreso de estudiar la tecnología de la piedra. Este artículo se basa en ese estudio.

NICHOLAS TOTH, DESMOND CLARK y GIANCARLO LIGABUE se aventuraron en las montañas de Nueva Guinea para estudiar a los últimos fabricantes conocidos de utensilios de piedra. Toth es profesor asociado de antropología en la Universidad de Indiana, donde además codirige el Center for Research into the Anthropological Foundations of Technology (CRAFT). Clark es profesor emérito de antropología de la Universidad de California, en Berkeley. Ligabue, empresario y antropólogo, es director del Centro de Investigación y Estudios Ligabue, de Venecia, Italia.

Los langda, fabricantes de hachas, viven a unos 2.000 metros de altitud en las vertientes meridionales de la cordillera central de Nueva Guinea, donde el clima es generalmente frío y húmedo. Las nubes suelen cubrir el pueblo, pero, cuando desaparecen, la vista de los picos cubiertos de nieve es magnífica. Nuestra mejor vista fue durante un viaje en helicóptero por un valle fluvial que discurre desde Wamena, 200 km al noroeste, yendo a media altura de sus escarpadas paredes.

Los habitantes se llaman a sí mismos kim-yal y a su idioma, perteneciente a una de las múltiples familias del papuano, uni. El hombre medio kim-yal mide un metro treinta y cinco centímetros; son más bajos que las poblaciones que habitan en altitudes inferiores, como los dani, de los altiplanos centrales, y los asmat, de la costa suroccidental. No está claro aún si la baja estatura de estos montañeses se debe a una adaptación a condiciones locales, causada por selección natural, o más bien a meros factores nutritivos.

Los fabricantes de hachas de piedra cultivan la batata y la raíz del taro y crían cerdos y pollos, dieta que complementan con plantas silvestres y caza menor. Cultivan sus plantas en campos, generalmente en forma de terrazas sobre las pronunciadas vertientes de los valles fluviales. Para roturar uno nuevo, a menudo tienen que talar árboles y extraer las raíces residuales, trabajos que históricamente han realizado con hachas de piedra, aunque estos utensilios están cediendo lentamente el paso a la importación de hachas de metal.

Los kim-yal forman grupos poblacionales abiertos de unas 200 personas, que ocupan entre 10 y 15 cabañas. Una cabaña típica alberga a un hombre, sus esposas y sus hijos. Los varones adultos pueden elegir además vivir parte del tiempo en una cabaña comunal, que funciona como una especie de club de hombres. El patrón residencial es patrilocal: los hombres suelen permanecer en la aldea en que nacieron, mientras que las mujeres se casan con hombres de otras diferentes. Hay 10 grupos poblacionales en la zona langda, la mayor parte de ellos situados en una meseta o en lo alto de una loma.

La artesanía de fabricación de hachas confiere un rango elevado a los varones especialistas que la practican y a sus hijos, quienes la aprenden de modo tradicional, por largos períodos de práctica. Hoy día, todo hombre langda es propietario de al menos dos hachas de piedra y, cada mujer, de una por lo menos. La mayor parte de los niños mayores de cinco años también portan un hacha a los campos, donde trabajan al lado de sus mayores.

Un arqueólogo tendería a clasificar estos objetos como azuelas, porque, en perspectiva lateral, el filo tiene una forma asimétrica plano-convexa en vez de la forma simétrica típica de las hachas. Además se enmangan

con el filo en ángulo recto respecto al mango, mientras que los de las hachas suelen situarse en el mismo plano. Las denominamos hachas, sin embargo, porque se usan para cortar madera y talar árboles y porque la bibliografía ha clasificado generalmente tales instrumentos con arreglo a su uso más que a su diseño. En otros grupos, el uso habitual de las azuelas no es talar árboles sino tallar madera.

El inicio de un hacha se halla en un trozo grande y regular de piedra, de una clase que fracture de forma previsible y produzca bordes afilados. Los mejores son los grandes cantos rodados de andesita, de grano fino y color azul-grisáceo, transportados desde su fuente volcánica por el río Hei, que fluye unos 800 metros más abajo del pueblo langda. Los fabricantes de hachas descienden al valle fluvial por senderos escarpados que serpentean entre bosques y campos hasta el cauce, trayecto que tardan unos 60 minutos en bajar y otros 90 en subir. Además de cantos rodados, recogen también piedras de lava más pequeñas, usadas como percutores.

Lo normal es que el operario sujete con sus manos un percutor de piedra grande, de unos 25 cm de diámetro, y golpee con él repetidamente contra un borde de un canto-núcleo de lava. Si lo hace correctamente, grandes lascas se separan del núcleo. Nos sorprendió descubrir que suelen mover el percutor entre sus piernas, técnica que no sabemos haya sido descrita antes etnográficamente, si bien creemos que podría haberse usado en la antigüedad para extraer grandes lascas.

Otras formas de obtener lascas apropiadas son arrojar el percutor contra el núcleo o preparar un fuego a su alrededor para iniciar fracturas. En algunas ocasiones, usan otros tipos de cantos rodados, de proporciones adecuadas. Un núcleo típico mide alrededor de 24 cm de longitud, 14 cm de ancho y siete de espesor.

Media hora de extracción de piedra produce de cinco a diez trozos aptos para la manufactura de hachas. La operación genera además cientos o miles de fragmentos más pequeños, restos de núcleos y percutores, que los operarios abandonan en la ribera del río, de donde serán arrastrados por la próxima crecida.

Los artesanos langda consideran que la manufactura consta de tres etapas definidas, que no resultarán ajenas a los paleolitistas. A cada una le corresponde una morfología de hacha y unos restos de talla característicos; estos últimos tienden a acumu-

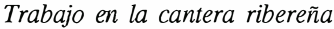


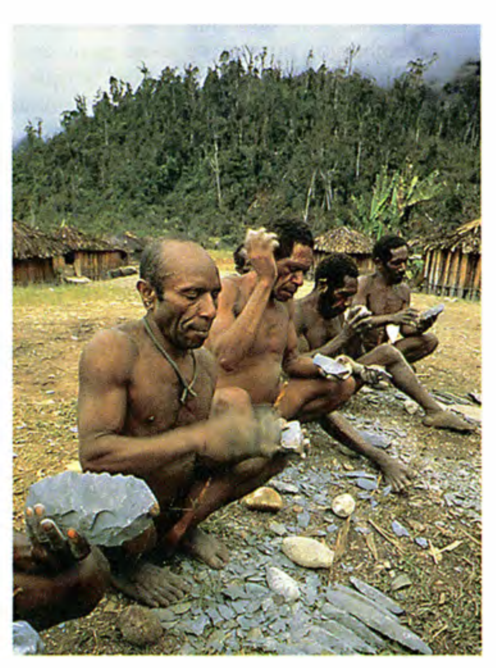
1. HERRAMIENTA DE PIEDRA DE LOS KIM-YAL; recuerda una azuela pero funciona como un hacha, usándose para cortar madera. La parte superior mide 30 cm.

Fabricación de un hacha de piedra



Trabajo en la cantera ribereña





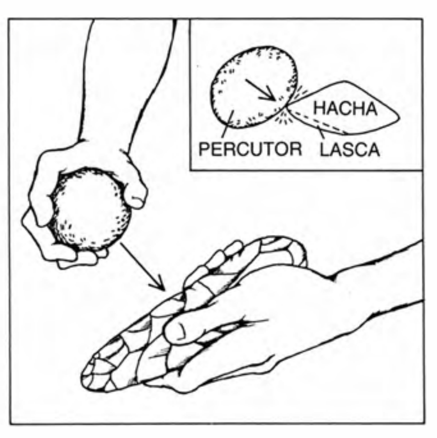
Talla de los bloques de piedra



Extracción de la piedra



Desbastado preparatorio



Tallado fino

larse en lugares diferentes del entorno. En la primera fase, el artesano usa un percutor de piedra de 10 a 12 cm de longitud para extraer grandes lascas de ambas caras del núcleo de lava, trabajo que suele hacerse en la cantera ribereña. El bifacial resultante es bastante tosco; tiene un aspecto denticulado y su contorno es un filo irregular y sinuoso. Estos "trozos en bruto" (prenúcleos) se desbastan mediante lascado para disminuir el peso de la carga y, sobre todo, por si un defecto interior causase la rotura de la piedra.

El segundo estadio de la manufactura del hacha puede realizarse tras regresar al pueblo, aunque lo normal es que se efectúe en una tienda de campaña situada en una terraza a unos 100 m por encima de la orilla del río. Allí, el fabricante de hachas puede trabajar a la sombra de la cabaña, calentarse al fuego, si hace frío, o asar batatas o caza mientras continúa tallando. La forma habitual de hacerlo es sentado sobre sus nalgas, sujetando el percutor de piedra con la mano derecha y el prenúcleo con la izquierda (todos los picapedreros que observamos eran diestros).

El artesano dispone de varios percutores de piedra, de tamaños, formas y grados de dureza diferentes, y usa uno u otro conforme requiera el proceso. A medida que el hacha se aproxima a su forma final, tiende a usar los más pequeños, al modo predicho por reconstrucciones previas de las técnicas líticas. Sin embargo, no esperábamos que se usasen éstos tan duros para labores de detalle, pues la mayoría de los arqueólogos hubiésemos caracterizado este retoque como de "percusión blanda", la que se hace con un trozo de madera, hueso u otro material suave.

Cada lasca sirve de base a un lascado posterior, creando el denominado plano de percusión. El propósito es aguzar el ángulo del filo, lo que se realiza usando el percutor para darle forma, aplanarlo y aligerarlo. Si todo va bien, se desprenden lascas planas y delgadas de la superficie del hacha y su aspecto general va siendo cada vez más delgado, estrecho y simétrico.



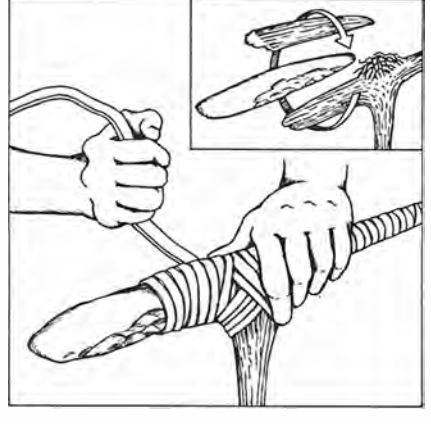
Terminación del hacha



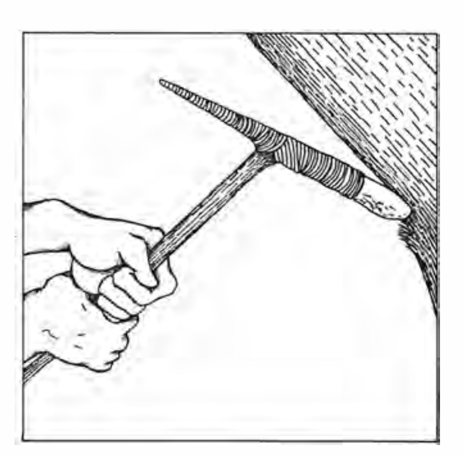
Unión del hacha al mango



Afilado



Enmangado



Uso del hacha

Los fabricantes de hachas trabajan solos o en grupo, lo que da ocasión para hablar, cantar y mostrar la propia obra.

Si se trabaja en grupo, sus miembros se sientan siempre en línea y mirando en la misma dirección, de modo que las afiladas esquirlas que saltan no vayan a parar a la cara de ninguno. Estos residuos, que se van haciendo más pequeños y delgados a lo largo del proceso, suelen encontrarse fuera del perímetro de la tienda de campaña. A veces, empero, se los encuentra alrededor de una cabaña del poblado, prueba de que algunos prenúcleos fueron llevados allí antes de que se empezase a trabajar en ellos.

Las mujeres del pueblo, muy a menudo parientes de los artesanos, son normalmente las encargadas de transportar los prenúcleos del valle al poblado. Se protegen de cortes y rasguños envolviendo las hachas con vegetación. Ponen los materiales en redes de carga, que colocan sobre sus espaldas y cuyo peso soportan con una correa que rodea su frente.

La reducción final del hacha suele realizarse una vez de regreso a Langda, por lo común cerca de la cabaña de un fabricante de hachas. Ahora el operario prepara su plano de percusión con extrema delicadeza, separando esquirlas muy pequeñas; también abrasiona la superficie. El producto final del lascado es un hacha larga, fina, de lados casi paralelos y sección triangular, cuyo extremo cortante es levemente convexo y tiene un filo biselado de unos 50 grados. En el tercer estadio, el hacha típica mide unos 20 centímetros de largo por cuatro de ancho y tres de alto, aunque a veces se fabrican algunas bastante más grandes o más pequeñas. El tiempo que se tarda en tallarla, desde la obtención del prenúcleo al estadio tercero, está comprendido entre 30 y 50 minutos, aproximadamente. De un 10 a un 20 por ciento de los núcleos se pierde por rotura.

Las lascas de desecho producidas en el poblado son mucho más pequeñas que las de fases anteriores. La secuencia completa de la manufactura de un hacha corriente, desde la ex-

tracción del núcleo a su terminación, produjo un total de 225 lascas y fragmentos mayores de dos centímetros de longitud (y abundancia de otros menores, hasta granos microscópicos). De aquéllos, unos 100 serían los producidos en Langda durante los últimos estadios de lascado. Terminan esparcidos en forma circular u oval, con la mayoría concentrada en un área de un metro cuadrado. Su dispersión posterior se debe probablemente al tránsito de personas o animales por la zona, terminando por quedar enterrados cuando se embarra.

Tras el lascado final, el artesano afila el borde del hacha contra una laja de arenisca fina humedecida. Estas piedras de afilar son muy apreciadas y proceden de un valle fluvial situado a unas seis horas de camino. Se sitúan cerca de una fuente de agua del poblado. El trabajador se agacha tras la piedra de afilar, riega su gastada superficie y afila el hacha contra ella. La mezcla de arenisca fina, partículas de lava y agua forma una pasta que sirve como abrasivo. Se inspecciona el hacha a intervalos regulares, se añade más agua y se presta especial atención al filo. Una hora de afilado, más o menos, da como resultado un cuerpo de hacha con el frente pulido y un filo muy regular.

Quizá sorprenda que los kim-yal pulan los bordes lascados, que ya tienen la mayor agudeza posible. La razón es simple: las herramientas pulidas conservan su filo por más tiempo y pueden volver a afilarse con facilidad. Hay, pues, buenas razones para pulir los útiles destinados a trabajar la madera y otros instrumentos que se usen a fondo durante períodos largos. No es casual que la denominada Edad de la Piedra pulimentada comenzase con el desarrollo de la agricultura, cuando se empezó a talar bosques para sembrar cosechas.

También las consideraciones estéticas deben pesar sobre los artesanos kim-yal, pues, de otro modo, no se molestarían en pulir más que unos pocos milímetros desde el borde de ataque. La verdad es que pulen el cuerpo del hacha casi hasta el punto en que desaparece bajo la ligadura al mango. Muchos otros artesanos prehistóricos, de Nueva Guinea y de otras partes del mundo, fueron más lejos, puliendo toda la superficie del utensilio. Una prueba adicional de propósitos estéticos la constituye el uso que hacen los kim-yal del ocre rojo y de otros pigmentos disponibles para cubrir las zonas irregulares de la superficie de las hachas. Esta utilización de pigmentos con fines estéticos o simbólicos está ampliamente documentada en culturas prehistóricas y en las sociedades modernas no industrializadas durante los últimos 35.000 años.

La adición de un mango permite que un utensilio amplíe su radio de acción y sea más eficaz. Los operarios enmangan el hacha terminada en un trozo de madera con forma de T, hecho con un tronco o rama de árbol del que salga una rama más fina con un ángulo de 45 grados, más o menos. La piedra se apoya en varias tiras de madera o de corteza fibrosa, lo que ayuda a absorber los golpes. El conjunto se ata luego firmemente con tiras de follaje, creando un diseño que distribuye la fuerza de los golpes de corte por la unión flexible. Sin esta flexibilidad, la piedra tendería a fracturarse a través de su eje menor.



2. DOS HOMBRES con hachas cortan este árbol, de unos 20 cm de espesor, en unos tres minutos. Este tipo de trabajo han de realizarlo para roturar campos de cultivo y obtener materiales para construir cabañas.

Un langda equipado con un hacha de éstas tala un árbol del grosor de un poste telefónico en cinco o diez minutos. También las utilizan para cortar raíces en el campo, para construir vallas que protejan las cosechas de los cerdos, y para fabricar utensilios agrícolas, contenedores y otras herramientas de madera. Un filo bien pulido suele aguantar varias horas de uso antes de que se embote. Cuando esto sucede, se vuelve a afilar fácilmente frotándolo contra una piedra de afilar humedecida, operación que suele hacerse con el hacha montada en su mango.

Usarán el hacha hasta que se rompa o hasta que los reafilados sucesivos la hayan reducido tanto que resulte inutilizable. Los trozos rotos pueden quedarse perdidos en el campo, pero tiene interés observar que la mayor parte de las piezas desgastadas o rotas acaban en el poblado. Los fabricantes de hachas dicen que "sienten pena" por su obra y se esfuerzan por volver a llevarla a casa antes de desecharla. Este tipo de relación personal con los utensilios aparece en la *Ilíada* y en la *Odisea*, pero puede que no sean muchos los antropólogos que hayan caído en que quizás ello explique los patrones de distribución en los yacimientos prehistóricos. Puede que nosotros y nuestros colegas debamos tener en cuenta tales factores.

Las hachas de piedra tienen un significado cultural que transciende su función práctica. En las fiestas no es raro el intercambio de hachas para reforzar los vínculos sociales y los hombres las entregan como pago de la dote, la compensación al padre por el privilegio de casarse con su hija. Nuestros informantes nos cuentan que, antes de que se introdujera la economía monetaria, podía cambiarse un hacha de piedra por un cerdo, el alimento más preciado. Hoy en día se pagan tres hachas de piedra por una de metal.

Los langda permutan sus hachas con otros poblados que carecen de piedra apropiada para fabricarlas. A unos seis días de camino hacia el norte, las gentes de Bima trocan sus bienes por hachas langda. Hacia el sur, el centro de intercambio principal, en el poblado de Lukan, al borde del altiplano, atrae a las

tribus kopkaka de las tierras bajas, quienes pagan las hachas con arcos, sarmientos, fibras para esteras, plumas de ave del paraíso o pieles de animales. En el pasado, el comercio de las hachas langda se extendía hasta la remota costa sur, donde se cambiaban por conchas. La especialización del trabajo que muestra la industria de las hachas tiene que haber dependido, en todo caso, de un comercio de amplia difusión geográfica. El registro prehistórico cuenta con huellas de tales redes comerciales amplias desde hace unos 35.000 años.

No deja de ser interesante que los langda no suelan utilizar otros útiles de piedra en sus actividades cotidianas. La excepción es un cuchillo, pequeño y plano, pulido de pizarra o de otra piedra blanda. Los lugareños usan estos cuchillos, cuya forma es oval, de riñón o subtriangular, para separar las hojas y el tallo de la raíz del taro, y para raspar su superficie externa, limpiarla y trocearla antes de cocinarla. También los usan para cortar las grandes hojas de las que se hacen las faldas de las mujeres. Pero para otros propósitos prefieren los materiales orgánicos. Por ejemplo, vimos hombres que descuartizaban cerdos con trozos de bambú afilados como cuchillas. Basta con arrancar una tira de bambú con una uña o con los dientes para que el instrumento disponga de un nuevo filo. Se ha recurrido a la versatilidad del bambú para explicar la sencillez de los útiles de piedra que aparecen en los yacimientos del Este asiático habitados por protohumanos durante cientos de miles de años.

Los fabricantes de hachas de Langda presentan muchos otros aspectos interesantes para los arqueólogos. Muestran cómo los horticultores usan instrumentos de piedra de una forma natural y económicamente sensata. Los residuos de su trabajo, en cada uno de los tres estadios de manufactura, puede que reflejen pautas conservadas en el registro arqueológico. En fin, los fabricantes de hachas tienen gran interés arqueológico porque diversas etapas de su manufactura parecen recapitular la evolución de la tecnología de la piedra.

El primer paso, la extracción de grandes trozos lascados de los cantos rodados, recuerda vívidamente la manufactura de los bifaces y hendedores de la Edad de la Piedra Antigua. La tecnología achelense la inventó *Homo erectus* hace 1,7 millones de años y continuó sin cambios en la época de *Homo sapiens* arcaico, hace unos 200.000 años [véase *The First Technology* de Nicholas Toth; SCIENTIFIC AMERICAN, abril de 1987]. El segundo estadio se refleja en los trozos en bruto (prenúcleos) de los langda, que recuerdan las denominadas hachas-núcleo de Sangoan y Lupemban, de la Edad de la Piedra Media del Africa ecuatorial. Se cree que, hace entre 200.000 y 100.000 años, los instrumentos sin enmangar sangoenses se usaron para trabajar la madera en el Africa tropical. La tercera fase, de pulido y enmangado de las hachas, corresponde casi perfectamente a las hachas asociadas con las comunidades agrícolas tempranas del Viejo y el Nuevo Mundo.

Las primeras pruebas de pulimento de hachas de piedra proceden de yacimientos de Nueva Guinea y Australia, cuya antigüedad es de más de 20.000 años. Sin embargo, tales objetos no aparecen con frecuencia en el registro arqueológico hasta después del surgimiento de las comunidades agrícolas, hace unos 10.000 años. Las hachas langda son claramente una de las últimas reminiscencias de esta tradición de la Edad de la Piedra.

Desde luego, no queremos dar la impresión de que cualquier estudio etnoarqueológico que se emprenda en tiempos modernos pueda revelar todos los secretos de la cultura tecnológica de la Edad de la Piedra Antigua. A diferencia de los antiguos inventores, los kim-yal tienen una anatomía de humanos modernos y poseen sistemas de lenguaje y culturas tan complejos como los de cualquier otro pueblo actual. No cabe duda de que sus formas de actuar son mucho más elaboradas que las de los protohumanos fabricantes de útiles.

Sospechamos, por poner un ejemplo, que la tendencia de los kim-yal a "apenarse" por el hacha que ha dejado de ser utilizable no se hubiese encontrado en muchos homínidos arcaicos, aunque dominasen el arte de la fabricación de hachas. Los antropólogos advierten que no se debe confundir la semejanza de comportamiento con la mental. No sería difícil enseñar a los cazadores-recolectores actuales a pilotar un avión Boeing 747, pero puede que no sucediese lo mismo con un *Homo erectus* de hace un millón de años, aunque al nacer se le hubiera adoptado por la sociedad moderna.

Hay otras formas de tratar de reconstruir la tecnología más primitiva de la piedra. Quienes trabajan en arqueología experimental fabrican y usan instrumentos de piedra utilizando materiales y métodos de los que disponían los pueblos prehistóricos. Los primatólogos estudian el uso de objetos por chimpancés en estado salvaje. Ambas líneas de investigación coincidieron hace poco en un experimento fascinante realizado en el Language Research Center, en Atlanta, dependiente de la Universidad estatal de Georgia y el Yerkes Regional Primate Research Center.

El experimento, emprendido por Susan Savage-Rumbaugh, Duane Rumbaugh y Rose A. Sercik en colaboración con uno de nosotros (Toth) y Kathy Schick, consistió en enseñar la artesanía de la piedra a un bonobo o chimpancé pigmeo. El bonobo, de nombre Kanzi, se ha mostrado capaz de captar las habilidades más elementales requeridas para desprender lascas de piedras y usarlas como objetos cortantes (*véase la ilustración 3*); incluso ha descubierto algunas nuevas por su cuenta, como lo es romper grandes piedras tirándolas contra un suelo empedrado. La investigación continúa para tratar de descubrir si Kanzi es capaz de transmitir sus conocimentos de fabricación de utensilios a otros bonobos. Estudios como éstos pueden ayudar a intuir las fronteras que separan la fabricación de útiles realizada por los humanos modernos, los primates no humanos y las poblaciones protohumanas.

¿Durante cuánto tiempo seguirá realizándose la fabricación de hachas de piedra y se conservará su compleja red de intercambio? Es muy probable que la red desaparezca dentro de pocos años, conforme los almacenes que suministran utensilios de metal vayan introduciéndose en montañas y altiplanos y la economía monetaria reemplace al sistema tradicional de trueque. Por lo que se refiere a la manufactura, dado que ninguno de los miembros jóvenes de la tribu está aprendiéndola en la actualidad, es verosímil que la mayor parte de esta hábil técnica de fabricación de hachas se pierda dentro de una o dos generaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PREHISTORY OF AUSTRALIA, NEW GUINEA AND SAHUL. J. Peter White y James F. O'Connell. Academic Press, 1983.

QUARRYING IN A TRIBAL SOCIETY. John Burton en *World Archaeology*, vol. 16, n.º 2, páginas 234-247; octubre de 1984.

INDONESIA: LA GRANDE DERIVA ETNICA. Editado por Gilda M. Ronzoni. Erizzo Editrice, 1986.

THE FIRST TECHNOLOGY. Nicholas Toth en *Scientific American*, vol. 256, n.º 4, páginas 112-121; abril de 1987.

Formación de cristales moleculares

Al estudiar cómo se unen las moléculas para formar cristales, los investigadores esperan sintetizar materiales con nuevas propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas

Paul J. Fagan y Michael D. Ward

El universo está lleno de cosas que cuidan de sí mismas: átomos que espontáneamente se unen para formar moléculas, montañas que van levantándose sobre el mar, estrellas que se agrupan en galaxias. Pero más impresionante aún es la autoorganización de los cristales.

Un copo de nieve, por ejemplo, comienza su existencia en las nubes como innumerables moléculas de agua. Las moléculas tienden a juntarse en pequeños grupos gracias a la débil fuerza atractiva que existe entre los átomos de oxígeno e hidrógeno de cada una de ellas. Estas mismas fuerzas organizan luego los grupos en un rígido cristal molecular, una red perfectamente ordenada de moléculas. Por último, varios cristales moleculares se unen y forman un copo de nieve, delicado y centelleante.

Hace tiempo que los investigadores se dieron cuenta de que las fuerzas que unen las moléculas en los cristales podrían utilizarse para producir diversos materiales interesantes. Se ha determinado la estructura de más de 90.000 cristales moleculares diferentes. Algunos son muy conocidos; así la aspirina o las bolas de naftalina. Otros poseen notables propiedades ópticas, eléctricas o magnéticas, incluso superconductividad [véase "Superconductores orgánicos", por Klaus Bechgaard y Denis Jérome, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1982].

Las propiedades de un cristal dependen, en gran medida, de la disposición de sus moléculas, pero todavía sabemos poco sobre los factores que controlan el ensamblaje. En los últimos años, y al igual que muchos otros científicos, nos hemos dedicado a investigar la organización que se dan a sí mismas las moléculas cuando forman cristales, con la esperanza de entender mejor qué tipos de moléculas y qué clase de condiciones generarán cristales moleculares con propiedades útiles y poco comunes.

La tarea de sintetizar un cristal molecular es parecida a la de diseñar un edificio. Al igual que los arquitectos han de especificar la forma y tamaño de las vigas y decidir el número y emplazamiento de los remaches antes de que se inicie una construcción, para producir nuevos cristales moleculares los químicos tienen que escoger moléculas con la forma y tamaño adecuados y elegir las fuerzas moleculares que mantendrán unido el cristal. Un químico dispone, por lo general, de muchas moléculas de formas y tamaños diferentes; el truco consiste en buscar las que se ensamblen de forma predecible.

Si se han diseñado adecuadamente, las moléculas pueden atraerse de muchas maneras. Las fuerzas atractivas son, por lo general, más débiles que los enlaces formados entre átomos, aunque las hay relativamente fuertes y de amplio radio de acción. Por ejemplo, un átomo cargado positivamente de una molécula atraerá a uno cargado negativamente de otra, decreciendo la intensidad de la fuerza por un factor de sólo un cuarto cuando se duplica la distancia entre las moléculas.

Otras fuerzas atractivas son débiles e influyen sólo en las moléculas vecinas. Sea el caso de dos moléculas muy próximas; la carga puede redistribuirse de manera que, mientras una se carga negativamente cerca del punto de contacto, la otra lo haga positivamente. A esta interacción, conocida como dipolo inducido, se la suele denominar fuerza de Van Der Waals. La intensidad de la fuerza dipolar decrece por un factor de 128 cuando se duplica la distancia entre moléculas.

Está al alcance de los químicos aprovechar la mayoría de las interacciones atractivas para construir cristales moleculares y, merced a la selección de moléculas específicas, elegir la fuerza que utilizarán en concreto. Si saben cómo interactúa una molécula y conocen su forma y tamaño, pueden comenzar a pronosticar la clase de cristales moleculares que podría formar. Gerhard M. J. Schmidt fue el pionero de este tipo de enfoque en los años sesenta, acuñando el término de "ingeniería cristalina".

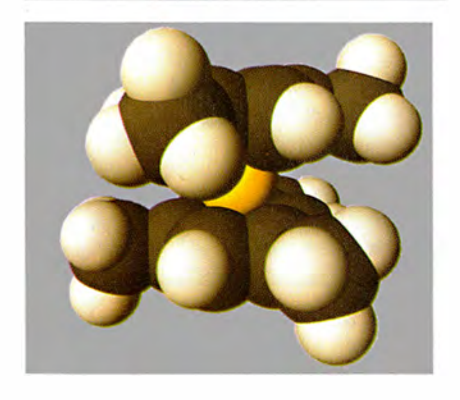
PAUL J. FAGAN y MICHAEL D. WARD colaboran desde hace seis años en la construcción de cristales moleculares. Fagan trabaja en el departamento central de investigación y desarrollo de la E. I. du Pont de Nemours and Company, desde 1982. Obtuvo su título de doctor en química inorgánica por la Universidad de North Western. Ward se doctoró en química por la Universidad de Princenton y es profesor asociado en el departamento de ingeniería química y ciencia de materiales en la Universidad de Minnesota; dirigió trabajos de investigación en Du Pont entre 1984 y 1990.

1. EL DISEÑO de cristales moleculares requiere bloques constructivos que se combinen de forma predecible. Moléculas planas conocidas como HCTMCP (*a la izquierda, arriba*) se agrupan con moléculas cilíndricas denominadas $Fe(MES)_2$ (*a la izquierda, abajo*). Las primeras tienen una carga de 2– y resultan atraídas hacia las moléculas cilíndricas, cuya carga es 2+. Se van así apilando en forma de columnas; la agregación de columnas forma el cristal. Esta disposición maximiza las fuerzas atractivas que hay entre las moléculas.

En 1973, Aleksandr I. Kitaigorodsky, de la Academia de Ciencias de Moscú, señaló uno de los principios fundamentales del diseño de cristales moleculares. Se dio cuenta de que las moléculas tienden a empaquetarse de manera que se minimice el espacio ocupado. (Las moléculas ocupan normalmente del 65 al 77 por ciento del volumen del cristal; el resto no es más que espacio vacío.) Es de esperar, pues, que la "protuberancia" de una molécula encaje en el "hueco" de alguna otra, o que una superficie plana de la primera se adose a otra similar de la segunda.

Si las moléculas se comportan así es porque el empaquetamiento denso equilibra las fuerzas atractivas y repulsivas. Con más precisión, la disposición que requiere un menor espacio tiene muchas probabilidades de ser la que minimice la energía total de las fuerzas actuantes entre todas las moléculas.

No cabe duda de que tales principios son importantes, pero resulta muy difícil predecir con exactitud el tipo de cristal que se formará a partir de una combinación de moléculas concreta. Para que pudiesen hacerlo con seguridad, los químicos necesitarían conocer todas las interacciones moleculares de una red dada. Con tal información, podrían calcular la energía total de cada distribución posible y predecir la configuración de menor energía.



Por desgracia, las interacciones moleculares en la red llegan a ser tan complicadas que no se pueden manejar ni por ordenador. Hay demasiados átomos implicados, demasiados tipos de interacción y demasiadas distribuciones posibles. Es más, la fuerza de las interacciones podría conocerse aproximadamente, pero tales valores no serían muy útiles, pues pequeñas variaciones pueden desempeñar un papel importante en el establecimiento de la estructura.

En fin, aun si se especificase de algún modo la estructura cristalina preferente que adoptará determinado grupo de moléculas, puede que no seamos capaces de fabricar tal cristal. Se está en los albores de la comprensión de las condiciones que

influyen en la estructura de un cristal molecular mientras se desarrolla.

Por lo pronto, se han identificado varias etapas del crecimiento cristalino. Comienza con la reunión de las moléculas en pequeños agregados, cuya estructura puede presentar ligeras variaciones. Que un agregado se combine o no con otros depende de su forma y de las condiciones ambientales. Los que lo hacen fácilmente llegarán a formar parte de un agregado mayor y, por último, a incorporarse en un cristal de considerable tamaño. En general, el crecimiento de un cristal molecular depende de la estructura de los agregados y de la facilidad con que se unan entre sí.

Las investigaciones de Gautam R. Desiraju, de la Universidad de Hyderabad, India, de Richard Robson, de la Universidad de Melbourne, Australia, de Margaret C. Etter, de la de Minnesota, EE.UU., y de Angelo Gavezzotti, de la de Milán, Italia, entre otros, han ido permitiendo conocer, a lo largo de los últimos diez años y para casos concretos, cómo puede relacionarse la estructura de las moléculas y de sus agregados con la de los cristales.

Desiraju ha mostrado cómo encaminar moléculas que tienen átomos de cloro hacia ciertos tipos genéricos de ordenaciones, aprovechando las interacciones atractivas que se dan entre los átomos. Robson ha descubierto que tienden a formarse estructuras cristalinas de baja densidad cuando los átomos de nitrógeno de compuestos metálicos se enlazan con iones metálicos. Etter ha investigado la influencia de los enlaces de hidrógeno en la estructura molecular, una interacción atractiva por la que los átomos de hidrógeno se comparten con otros átomos, quizá de oxígeno.

Gavezzotti ha estudiado anillos aromáticos, moléculas caracterizadas por un tipo especial de enlaces entre los átomos de carbono. Desde hace algún tiempo se sabe que los anillos aromáticos, como son el benceno y el naftaleno, cristalizan en estructuras con forma de T o de espiga. Sin embargo, Gavezzotti descubrió que, si la proporción de los átomos de carbono a los de hidrógeno es grande, los anillos aromáticos tienden a organizarse en la red cristalina como apilamientos de moléculas.

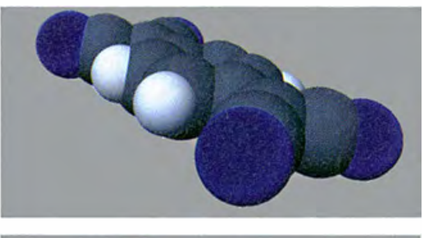
En 1987, nosotros comenzamos a desarrollar una estrategia diferente para estudiar cómo se unen las moléculas hasta formar cristales. Buscábamos componentes moleculares que se combinasen de manera simple y predecible. Los cristales deberían mantenerse unidos merced a la sencilla fuerza atractiva que se da entre los átomos cargados, negativa y positivamente, de la molécula. Diseñamos, pues, moléculas cargadas que tuviesen formas bien definidas y que pudieran empaquetarse fácilmente en una red cristalina. Ideamos también moléculas que, aun siendo idénticas en forma y tamaño, tuviesen diferentes propiedades eléctricas.

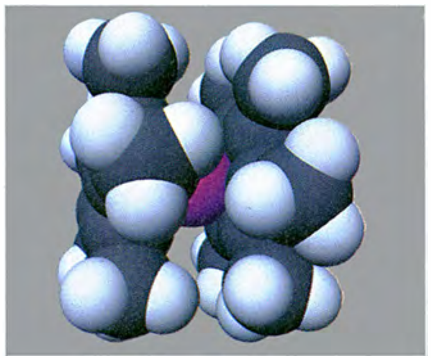
Gracias a este enfoque y durante los últimos cinco años, hemos obtenido varios materiales nuevos, al tiempo que hemos logrado entender algunos aspectos de la forma en que las moléculas se combinan, primero en agregados y luego en cristales.

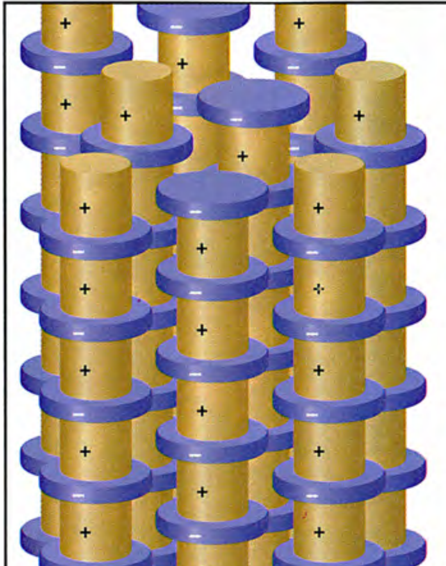
La mayor parte de nuestro trabajo la hacemos con dos especies de moléculas: policianoaniones y compuestos organometálicos. Los policianoaniones son un tipo de moléculas planas que contienen carbono y nitrógeno. Los compuestos organometálicos están constituidos por carbono, hidrógeno y átomos metálicos; hierro, por ejemplo. Expondremos algunas de las razones que tuvimos para seleccionarlas.

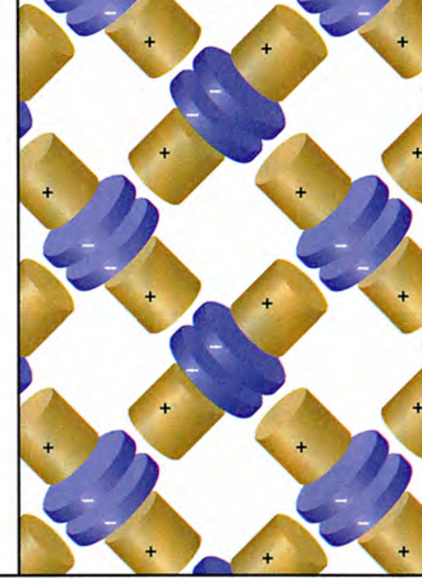
El motivo principal de que escogiéramos los policianoaniones fue que se asocian de forma predecible. La carga de los policianoaniones es 1– o 2– y pueden ceder electrones a otras moléculas, con el resultado de una débil atracción entre ellas. Bajo ciertas condiciones, comparten electrones entre sí, formando parejas o, como dicen los químicos, un dímero. En otras condiciones, los comparten con muchas moléculas, apilándose entonces como las láminas de un pastel de hojaldre y formando extensas cadenas. En ambos casos, apareadas o apiladas, las moléculas comparten su electrón más externo, lo que hace disminuir la energía total del conjunto. También nos interesaban los policianoaniones porque sospechábamos que podrían formar cristales dotados de propiedades electrónicas inusuales.

Los policianoaniones, cargados negativamente, no tienen dificultad para combinar con compuestos organometálicos, cargados positivamente. Más en concreto, decidimos trabajar









2. LAS MOLECULAS SENCILLAS tienden a unirse de formas también sencillas, pero variadas. Así, la molécula cilíndrica denominada $(Cp^{*})(Ru^{1+})$(HMB) (*abajo, a la izquierda*) puede combinarse de dos formas con la molécula de $TCNQ^{1-}$ (*arriba, a la izquierda*). Pueden apilarse una sobre otra (*centro*) o ensamblarse en una estructura ortogonal (*derecha*).

con un tipo de moléculas organometálicas que los químicos denominan, a veces, compuestos tipo "sandwich" o emparedado. Son moléculas en las que cada átomo metálico está encerrado entre anillos de átomos de carbono, y presentan una carga de 1+ o 2+. Pertenecen a este grupo moléculas con una amplia variedad de formas y distribuciones de carga. Las más sencillas son cilíndricas y tienen una sola carga en el centro, pero también las hay con forma de varilla, cargadas en los extremos, tetraédricas, con cargas en cada vértice, e incluso otras cúbicas u octaédricas.

Las moléculas "sandwich" tienen una ventaja importante. Los átomos de carbono e hidrógeno son los que determinan su forma global, pero son los átomos metálicos los responsables de la mayor parte de sus propiedades electrónicas. De aquí que dos moléculas "sandwhich" puedan tener idéntica estructura y diferentes propiedades, por el simple hecho de que una de ellas esté basada, digamos, en el hierro mientras que la otra contenga rutenio. Confiábamos en que la utilización de tales parejas nos permitiese modular las propiedades electrónicas de los cristales moleculares.



3. EL ELECTRODO, situado dentro de un matraz de vidrio, carga las moléculas de TCNQ que hay en disolución y ocasiona la formación de cristales moleculares.

Cuando se combinan moléculas "sandwhich" cargadas positivamente con policianoaniones cargados negativamente, se atraen unos a otros formando agregados. Su forma, y la de los cristales de ellos derivados, resulta de la forma de las moléculas "sandwich", del ordenamiento de las cargas dentro de las moléculas y de las condiciones del crecimiento. También influye en la estructura cristalina el principio de neutralidad eléctrica, que requiere que el número de cargas negativas sea igual al de cargas positivas.

Como norma general, seguimos un orden lógico para realizar nuestros experimentos. Comenzamos con moléculas de forma y distribución de cargas sencillas, pasando luego a otras más complicadas.

El componente molecular más elemental que utilizamos fue un compuesto "sandwich" de forma cilíndrica y con una carga positiva en el centro. La parte superior de esta molécula es una estructura denominada pentametilciclopentadieno o Cp^*. Es un anillo plano de cinco átomos de carbono, cada uno de los cuales está unido a un grupo metilo (formado, a su vez, por un átomo de carbono y tres de hidrógeno). La parte inferior de la molécula es hexametilbenceno, HMB, otro anillo plano, esta vez de seis átomos de carbono en vez de cinco, adornado también cada uno con un grupo metilo. En el centro de la molécula se encierra un átomo de rutenio, unido a los de carbono del Cp^* y del HMB. Este átomo presenta una carga de 1+ y está rodeado por otros de carbono e hidrógeno. La molécula completa se abrevia como $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$. (El superíndice 1+ indica la carga de la molécula.)

Tratábamos de combinar esta molécula cilíndrica con un policianoanión llamado tetracianoquinodimetano, $TCNQ^{1-}$, consistente en una red plana de 12 átomos de carbono, con cuatro átomos de nitrógeno y otros cuatro de hidrógeno en sus extremos. El TCNQ puede portar una carga de 1–.

La preparación de $TCNQ^{1-}$ se hizo situando un electrodo cargado negativamente en una disolución de TCNQ neutro y $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$. Se obtienen así dos tipos diferentes de cristales moleculares: uno es de color verde esmeralda y el otro púrpura oscuro. Ambos poseen la misma fórmula molecular, pero difieren en la organización interna.

Ayudados por Joseph Calabrese, de Du Pont, utilizamos cristalografía de rayos X para determinar la estructura de cada uno de ellos. Bombardeamos las muestras con rayos X y registramos la radiación dispersada por sus átomos. Esta información permite deducir la disposición de los átomos en el cristal.

Los cristales verdes están formados por columnas paralelas entre sí, cada una de las cuales contiene $TCNQ^{1-}$ y $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$. La superficie plana de las moléculas de $TCNQ^{1-}$ encaja perfectamente contra los anillos de carbono superiores e inferiores del $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$, alternándose ambas moléculas por toda la longitud de la columna.

La estructura de los cristales púrpura es más complicada. Las moléculas de $TCNQ^{1-}$ se ensamblan por parejas una contra otra y cada dímero se intercala entre dos moléculas de $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$. Las unidades cilíndricas resultantes se empaquetan, a su vez, en forma de espiga, situándose cada una de ellas en posición aproximadamente perpendicular respecto de sus vecinas más cercanas (*véase la ilustración 2*).

No nos sorprendió que $TCNQ^{1-}$ y $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$ formasen, al combinarse, más de un tipo de cristal molecular: sus sencillas forma y dis-



Influencia de las condiciones sobre el crecimiento de los cristales

De una disolución que contenga la molécula cilíndrica $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$ y el compuesto plano TCNQ pueden obtenerse cristales moleculares con estructuras diferentes.

El factor determinante es la cantidad de corriente eléctrica que fluya a su través. Una corriente intensa produce muchas moléculas de TCNQ con carga 1-, mientras que otra débil genera pocas.

1a. Si la concentración de $TCNQ^{1-}$ es mucho mayor que la de moléculas TCNQ neutras, $TCNQ^{1-}$ forma dímeros.

1b. Si la concentración de $TCNQ^{1-}$ es parecida a la de TCNQ neutro, ambas moléculas se agrupan en unidades de cuatro.

2a. Los dímeros de $TCNQ^{1-}$ son atraídos hacia moléculas de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$.

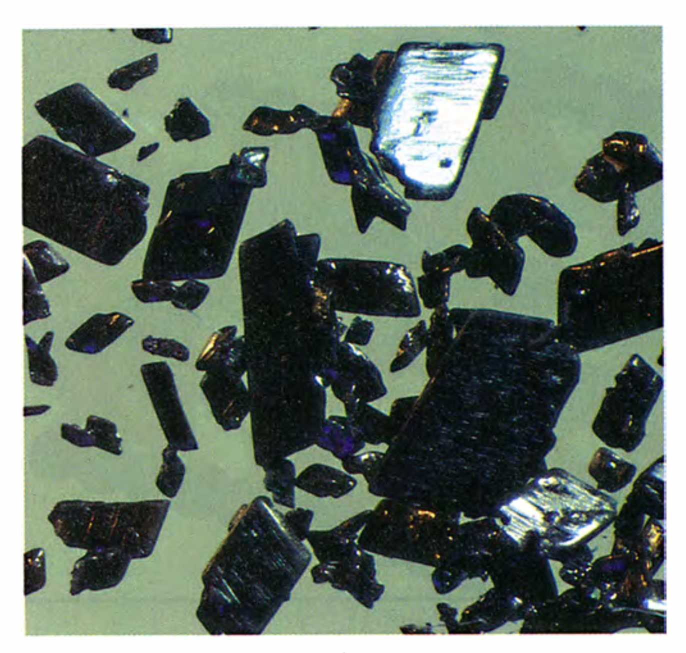
2b. Los bloques de TCNQ son atraídos por moléculas de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$.

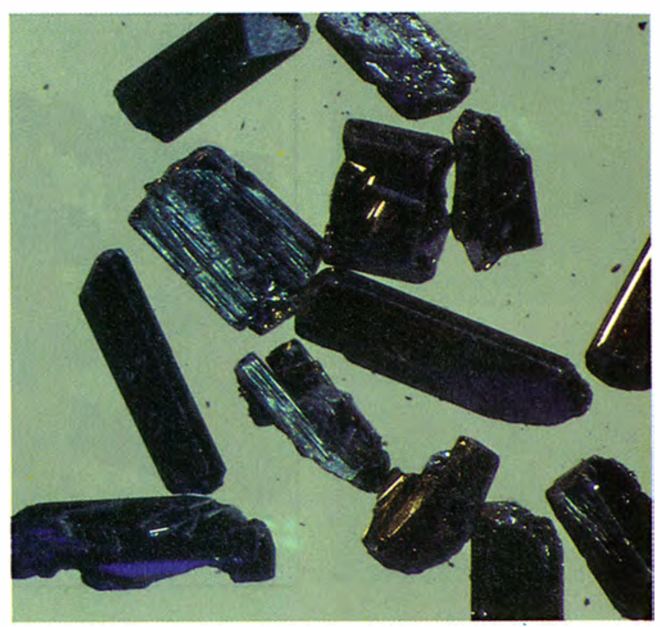
3a. El ensamblaje se hace de forma que los pares de TCNQ se adosan por encima o por debajo de las moléculas de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$.

3b. El ensamblaje se hace de forma que surjan columnas de TCNQ y de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$ independientes.

4a. Los agregados se asocian y terminan produciendo un cristal romboédrico muy reflectante.

4b. Los agregados se asocian y terminan produciendo un cristal negro y alargado, conductor de la electricidad.







4. LOS CRISTALES ROMBOÉDRICOS de la izquierda se obtuvieron de moléculas de TCNQ y de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})$ (Cp^*), igual que los aciculares de la derecha. Difieren en su estructura molecular (*véase el recuadro*).

tribución de cargas les permiten asociarse de, al menos, dos maneras diferentes.

Pasamos a examinar qué ocurriría si se combinase TCNQ con una molécula alargada que tuviese cargas en sus extremos. Buscamos una dotada de tales características y nos decidimos por el compuesto cuya fórmula abreviada es $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$, que, en realidad, no es más que dos moléculas $(Cp^*)(Ru^{1+})(HMB)$ conectadas por dos cortos puentes, formados por átomos de carbono e hidrógeno.

Los extremos superior e inferior de la molécula están constituidos por Cp^*, el anillo de cinco átomos de carbono y cinco grupos metilo. Cada Cp^* enlaza con un átomo de rutenio, cuya carga es 1+. Los átomos de rutenio se hallan conectados, a su vez, por medio de un ciclofano (CYC), hidrocarburo formado por dos anillos unidos por dos puentes. Por consiguiente, la molécula de $(Cp^*)(Ru^{1+})$ $(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$ es aproximadamente cilíndrica y tiene situados sus átomos de rutenio cargado cerca de los extremos.

Mezclamos disoluciones de (Cp^*) $(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$ y TCNQ neutro y volvimos a formar $TCNQ^{1-}$ gracias a un electrodo cargado negativamente. Cuando se le aplicaba un voltaje alto, se formaban sobre él cristales púrpura. Si el voltaje era bajo, lo que crecían eran cristales negros aciculares.

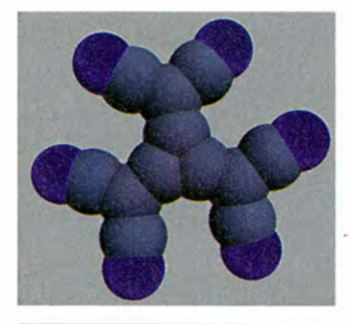
El análisis de la estructura de ambos tipos de cristal, púrpura y negro, nos permitió deducir por qué se forman cristales distintos en condiciones diferentes. Cuando el electrodo está sometido a un voltaje negativo alto, se producen muchas moléculas de TCNQ con carga 1–, que se combinan y forman dímeros. Cada dímero, ahora con carga 2–, se ve atraído por el $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)(Ru^{1+})(Cp^*)$, cuya carga es 2+. La cara plana del dímero se adosa contra la superficie plana de la molécula de rutenio y forma un gran agregado cilíndrico. El apilamiento posterior de estas unidades origina columnas en las que cada dímero está intercalado entre dos moléculas de rutenio. Las columnas se disponen paralelamente unas a otras y resulta un cristal púrpura romboédrico.

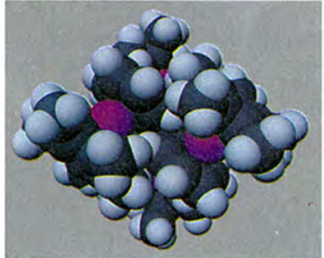
Cuando el voltaje negativo aplicado al electrodo es bajo, el ritmo de formación de moléculas de TCNQ cargadas es más lento y hay una concentración parecida de $TCNQ^{1-}$ y de TCNQ neutro. En estas condiciones, dos moléculas de TCNQ cargadas se combinan con otras dos neutras y forman un apilamiento de cuatro. Cada una de estas unidades, dotada de carga 2–, se alinea al costado de una de las moléculas de $(Cp^*)(Ru^{1+})(CYC)$ $(Ru^{1+})(Cp^*)$, cuya carga es 2+. Si este particular alineamiento maximiza las fuerzas atractivas entre la unidad de cuatro moléculas de TCNQ y la molécula de rutenio es porque una y otra tienen la misma longitud. Estos agregados se ensamblan luego de forma parecida a como se cierra una cremallera, proceso que origina columnas formadas por moléculas de TCNQ o de rutenio. Su disposición paralela produce un cristal negro acicular.

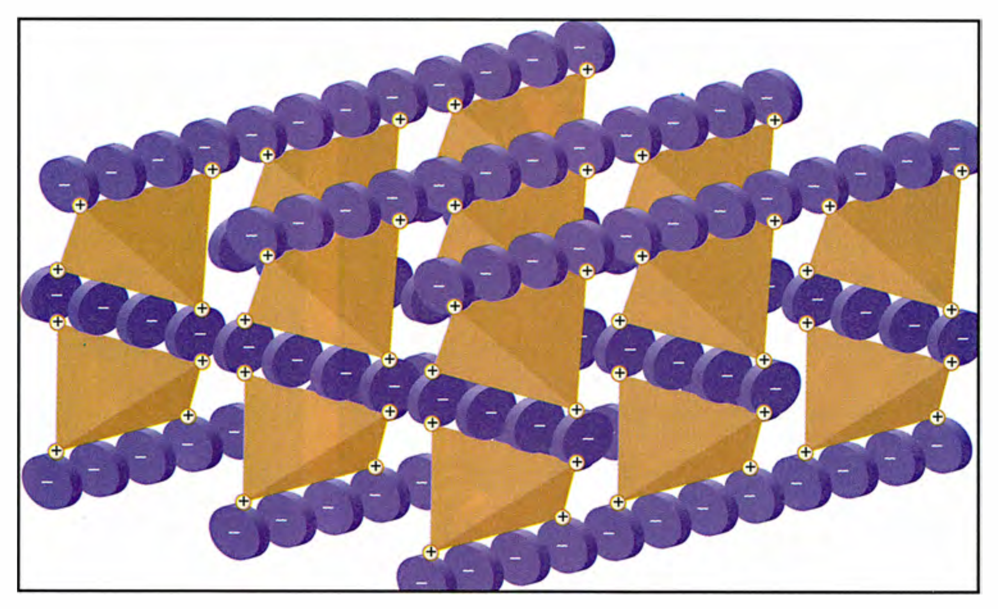
Los cristales negros y los púrpura difieren no sólo por su estructura, sino también por sus propiedades electrónicas. En los últimos, la carga está confinada en las moléculas de TCNQ y de rutenio. En el cristal negro, cada dos moléculas de TCNQ presentan una carga 1– y los apilamientos de TCNQ no están interrumpidos por las moléculas de rutenio. El resultado es que a los electrones les resulta fácil moverse por las columnas de TCNQ y el cristal es un buen conductor de la electricidad (*véase el recuadro*).

Se demuestra así que un compuesto "sandwich" delimita la escala de estructuras moleculares posibles, correspondiendo a las condiciones experimentales determinar cuál de ellas acaba por convertirse en realidad. En uno y otro caso, la estructura del cristal molecular viene condicionada por los agregados que se forman durante las etapas iniciales de su crecimiento.

Lo que nos propusimos saber a continuación fue si distribuciones de carga más complicadas podrían combinarse de manera predecible. Para ello utilizamos una molécula "sandwich" formada por una red tetraédrica de átomos de carbono e hidrógeno, en cuyos vértices se asientan cargas positivas, asociadas a átomos de rutenio. La combinamos con un policianoanión conocido como hexcianotrimetilenciclopropano, HCTMCP,







5. LAS MOLECULAS MAS COMPLICADAS tienden a formar estructuras complejas, pero igualmente predecibles. La denominada $[(Cp^{*})(Ru^{1+})(C_6H_5)]_4C$ (*abajo, a la izquierda*) se combina con el compuesto plano HCTMCP (*arriba, a la izquierda*), dotado de carga negativa. La molécula de $[(Cp^{*})(Ru^{1+})(C_6H_5)]_4C$ contiene cuatro cargas positivas, que se distribuyen en los vértices de un tetraedro y hacen que las moléculas de HCTMCP se dispongan en forma de columnas entrelazadas (*derecha*).

cuya molécula está constituida por tres ramas en forma de Y, engarzadas a un anillo triangular de tres átomos de carbono. Las ramas están formadas por otros tres átomos de carbono y tienen dos átomos de nitrógeno en sus extremos. La molécula de HCTMCP es plana y puede soportar una carga de 1–.

Cuando combinamos moléculas de HCTMCP cargadas negativamente con las tetraédricas, cargadas positivamente, se formó un cristal de estructura predecible. El cristal consta de unidades de cuatro $HCTMCP^{1-}$ y una molécula tetraédrica. Dos de las cargas positivas del tetraedro favorecen que el $HCTMCP^{1-}$ se apile en una dirección, mientras las otras dos le obligan a hacerlo perpendicularmente a ella. El resultado es una red de columnas de $HCTMCP^{1-}$ intercaladas entre moléculas tetraédricas (*véase la ilustración 5*). Pensamos que la distribución de la carga de las moléculas tetraédricas es el factor determinante del crecimiento del cristal en estos experimentos.

Aunque seguimos investigando, al igual que otros colegas, cómo funciona la combinación de moléculas cargadas negativamente con compuestos tipo "sandwich" cuyas distribuciones de carga sean más complicadas que la de las moléculas tetraédricas, también nos hemos interesado por la influencia que tenga en el desarrollo del cristal el cambio no de la distribución, sino de la magnitud de la carga.

Para estudiarla, elegimos $(Fe^{2+})(MES)_2$, una molécula cilíndrica, con un único átomo de hierro engarzado en el centro, que presenta una carga de 2+. El átomo de hierro está conectado a dos anillos mesitileno (MES), formado cada uno por seis átomos de carbono unidos a tres átomos de hidrógeno y tres grupos metilo.

Lo hicimos combinando $(Fe^{2+})(MES)_2$ con $HCTMCP^{1-}$. Estas últimas moléculas de $HCTMCP^{1-}$ prefieren compartir uno de sus electrones entre sí, razón por la que tienden a apilarse en forma de columnas. El cristal surge cuando cada columna de HCTMCP se ve rodeada por otras columnas de $(Fe^{2+})(MES)_2$.

Los resultados fueron muy diferentes cuando combinamos $(Fe^{2+})(MES)^2$ con HCTMCP cargado con 2–. Las moléculas de $HCTMCP^{2-}$ no comparten sus electrones entre sí y se repelen. Mejor dicho, el $HCTMCP^{2-}$ prefiere apilarse sobre el $(Fe^{2+})(MES)_2$. Esta preferencia conduce a la formación de columnas cuyos componentes son alternativamente $HCTMCP^{2-}$ y $(Fe^{2+})(MES)_2$. Las columnas se agrupan de tal manera que cada $HCTMCP^{2-}$ tenga ocho vecinos: dos $(Fe^{2+})(MES)_2$ en la misma columna y seis $(Fe^{2+})(MES)_2$ en las columnas adyacentes (*véase la ilustración 1*).

En este cristal, el $HCTMCP^{2-}$ prefiere compartir sus electrones con el $(Fe^{2+})(MES)_2$. La consecuencia de ello es que una pequeña cantidad de carga eléctrica de la molécula de $HCTMCP^{2-}$ se transfiere a la molécula de $(Fe^{2+})(MES)_2$, transferencia que reduce la energía total de los electrones. En última instancia, el proceso favorece la formación de columnas que contienen ambas moléculas, $HCTMCP^{2-}$ y $(Fe^{2+})(MES)_2$. Este experimento demuestra que la formación de cristales moleculares no sólo depende de la estructura de las moléculas matriz, sino también de los estados electrónicos de los componentes.

El cristal formado por $(Fe^{2+})(MES)_2$ y $HCTMCP^{2-}$ destaca por otra razón, a saber, que podemos cambiar esencialmente sus propiedades electrónicas sin alterar su estructura. Para hacerlo creamos otro cristal de $(Ru^{2+})(MES)_2$ y $HCTMCP^{2-}$ en vez de $(Fe^{2+})(MES)_2$ y $HCTMCP^{2-}$. La estructura es idéntica pero, mientras el cristal que tiene hierro absorbe la luz roja, el de rutenio captura la luz azul. El átomo de rutenio influye en la estructura electrónica del cristal haciendo variar sus características de absorción.

Produjimos otro cristal que absorbía ambos tipos de luz, la roja y la azul, gracias a la mezcla de $(Ru^{2+})(MES)_2$ y $(Fe^{2+})(MES)_2$ con HCTMCP. Alterando la proporción de hierro y rutenio, pudimos variar las cantidades absorbidas de cada una, lo que hacía cambiar el color del cristal.

Este ejemplo muestra una importante propiedad de los cristales moleculares basados en compuestos organometálicos. Por lo general, la

estructura de un compuesto organometálico y la del cristal molecular derivado de él no dependen de que el compuesto incorpore hierro, rutenio o cualquier otro átomo metálico, pues viene determinada sobre todo por la capa externa de átomos de carbono e hidrógeno. No obstante, los átomos metálicos influyen en las propiedades electrónicas del cristal y, en muchos casos, esta influencia se puede predecir. Creemos que la modulación de las propiedades electrónicas de los cristales moleculares, así realizada, conducirá a la obtención de nuevos materiales.

La ingeniería cristalina ofrece grandes posibilidades en diversas áreas tecnológicas. Sus recursos podrían permitir la fabricación de cristales moleculares con grandes poros, estructuras que podrían considerarse como zeolitas [véase "Zeolitas sintéticas" por George T. Kerr; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1989]. Los cristales moleculares porosos podrían servir para filtrar moléculas según su tamaño, o también para alojarlas dentro de sí, lo que daría como resultado materiales con propiedades estructurales o electrónicas útiles. Otros enfoques permitirían obtener nuevos materiales de características mecánicas, ópticas o electrónicas únicas. Los cristales moleculares podrían utilizarse para el almacenamiento magnético de información, sistemas láser o dispositivos electrónicos.

Nuestro trabajo demuestra que puede controlarse la organización de la materia de forma predecible, dentro de límites razonables, si se utilizan las interacciones atractivas que se dan entre moléculas cargadas positiva y negativamente. Podemos preguntarnos si seremos capaces de aplicar lo que sabemos para fabricar estructuras del tamaño de la milmillonésima parte del metro. Si así fuera, puede que el futuro nos deparase una nueva generación de dispositivos electrónicos y de diminutos aparatos mecánicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR CRYSTALS AND MOLECULES. Aleksandr I. Kitaigorodsky. Academic Press, 1973.

CONDUCTORES DE CADENA LINEAL. Arthur J. Epstein y Joel S. Miller, en *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1979, páginas 16-28.

CRISTAL ENGINERING: THE DESING OF ORGANIC SOLIDS. Gautam R. Desiraju. Elsevier Science Publishing, 1989.

Proteínas G

Son moléculas polifacéticas que, alojadas en la cara interna de la membrana de la célula, coordinan las respuestas celulares ante numerosas señales procedentes del exterior

Maurine E. Linder y Alfred G. Gilman

Para que una persona pueda pensar, actuar o, simplemente, existir, las células de su cuerpo deben comunicarse entre sí, comunicación que efectúan poniendo en marcha mensajeros químicos, como las hormonas circulantes y los neurotransmisores. Puede resultar sorprendente que sean contados los mensajeros que necesitan penetrar en el interior de la célula destinataria para desencadenar los cambios funcionales; la mayoría hace llegar la información a su destino a través de intermediarios. En la superficie de la célula diana hay proteínas que les sirven de receptores específicos; el hecho de ligarse a ellas se convierte en una orden. Después, en un proceso denominado transducción de señales, los receptores, que abarcan el espesor de la membrana, transmiten a su vez la información a una serie de emisarios intracelulares que, por fin, la pasan a los ejecutores finales.

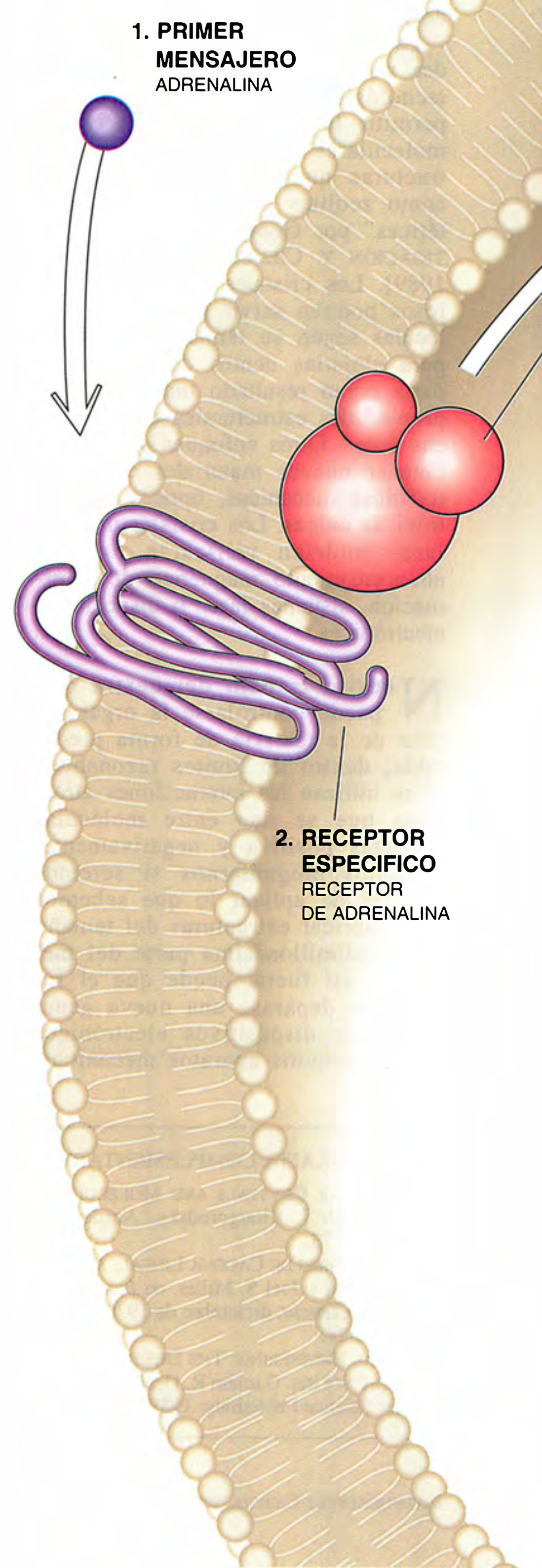
Se han descubierto docenas de mensajeros extracelulares. Podría concebirse que cada uno desencadenase una serie de interacciones moleculares propias y exclusivas, pero ha resultado que buena parte de ellos se apoyan en una sola clase de moléculas, las denominadas proteínas G, para dirigir el flujo de señales desde el receptor al resto de la célula. Las proteínas G se llaman así porque ligan nucleótidos de guanina, que, al igual que los demás nucleótidos, están constituidos por una base orgánica (en este caso la guanina), un azúcar y uno o más fosfatos.

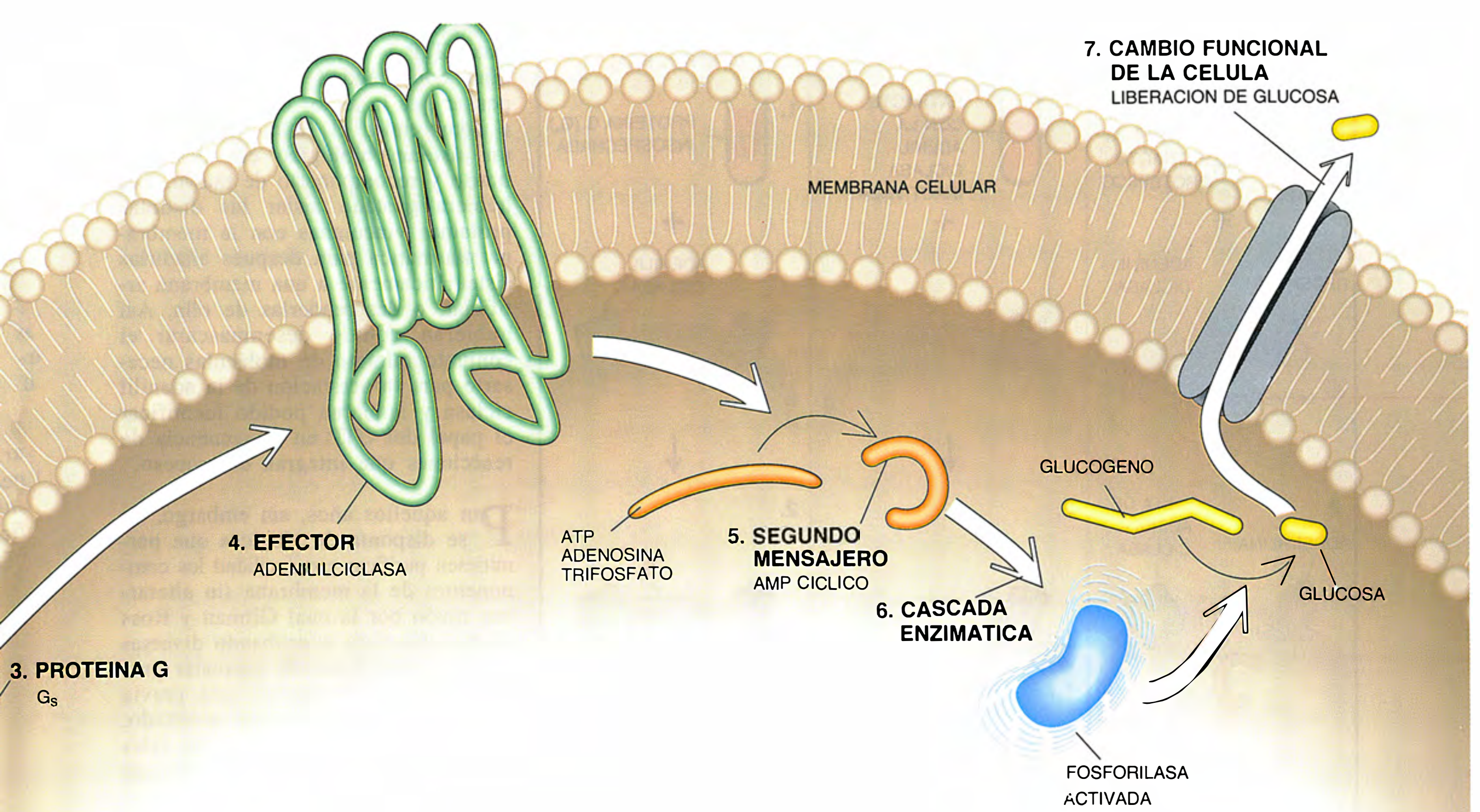
Uno de nosotros (Gilman) y sus colaboradores caracterizamos las proteínas G como intermediarios fundamentales de la transducción de señales a finales del decenio de los setenta en la Universidad de Virginia. Poco después, ya en el Centro Médico del Suroeste de la Universidad de Texas, en Dallas, hemos conseguido descifrar mucho de lo que hoy se sabe acerca del funcionamiento de estas notables proteínas. Nos siguen fascinando sus habilidades y el papel central que desempeñan en una gran variedad de funciones celulares, que cada día parece ampliarse: desde la reproducción sexual de las levaduras o los movimientos, químicamente inducidos, de los mohos del limo, a la visión, el olfato, la secreción de hormonas, la contracción muscular o el reconocimiento entre las personas.

A lo largo de estos últimos años, se ha averiguado también que las proteínas G transductoras de señales forman parte de una gran superfamilia de proteínas: las reguladas por nucleótidos de guanina. Además ha quedado claro que las alteraciones en el funcionamiento de las proteínas G, y de otras emparentadas con ellas, intervienen en el desarrollo de enfermedades como el cólera, la tos ferina y el cáncer. No sería extraño que, algún día, el empleo de fármacos selectivamente dirigidos a regular proteínas G específicas llegase a convertirse en habitual.

Quienes las estudian tienen contraída una deuda importante con W. Rall y Earl W. Sutherland, Jr., este último ya fallecido, cuyos trabajos pioneros abrieron el capítulo de

MAURINE E. LINDER y ALFRED G. GILMAN forman parte del departamento de farmacología del Centro Médico del Suroeste de la Universidad de Texas, Dallas. Linder se doctoró en biología molecular y celular por la misma Universidad en 1987, donde ahora es profesora ayudante. Gilman permaneció un decenio en la de Virginia antes de llegar a ser catedrático y director del departamento de farmacología del Centro Médico del Suroeste en 1981. En 1987 ocupó la cátedra de Neurofarmacología Molecular y, en 1989, le fue concedido el Premio Albert Lasker de Investigación en Ciencias Médicas Básicas.





1. LA PROTEINA G (*cúmulo rojo*) de una célula hepática transmite señales (*flechas*) de la hormona adrenalina (*esfera púrpura del extremo izquierdo*) hasta una serie de moléculas liberadoras de glucosa (*cápsulas amarillas del extremo derecho*). La ruta seguida por estas señales es típica de las reguladas por proteínas G; sus rasgos básicos aparecen numerados y en negrita. En este caso, la adrenalina, un primer mensajero, abre la vía al unirse a su receptor (*malva*), que insta a la proteína G_s para que active a la adenilil ciclasa (*verde*). Esta enzima, que es un efector, convierte el ATP (*cilindro naranja*) en el segundo mensajero, AMP cíclico (*bucle naranja*). El AMP cíclico hace que se dispare una cascada de reacciones enzimáticas que activa la enzima fosforilasa (*azul*) para que convierta el glucógeno (*cinta amarilla*) en glucosa, que la célula vierte finalmente al exterior.

la señalización celular a finales de los años cincuenta en la Universidad Western Reserve (hoy llamada Case Western). Actualmente sabemos que receptores celulares muy diversos se hacen eco de las instrucciones de hormonas y otros "primeros mensajeros" extracelulares mediante la excitación de una u otra proteína G. Adosadas a la superficie interna de la membrana celular (la membrana plasmática), estas proteínas actúan, a su vez, sobre intermediarios unidos igualmente a ella, que reciben el nombre de efectores. A menudo, el efector es una enzima que convierte la molécula de un precursor inactivo en un "segundo mensajero" activo; éste se difunde por el citoplasma y puede así transportar la señal más allá de los límites que marca la membrana. El segundo mensajero desencadena una cascada de reacciones moleculares que termina en un cambio funcional de la célula; por ejemplo, que empiece a segregar una determinada hormona, o a liberar glucosa, al medio.

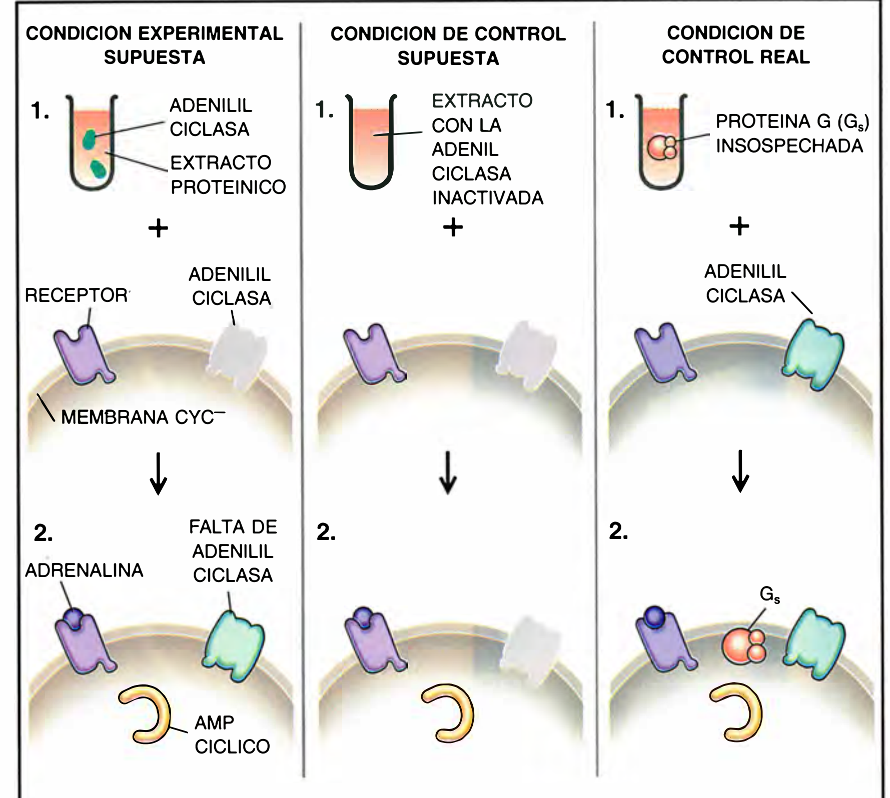
En los años cincuenta, los entresijos de la señalización intracelular permanecían en la más completa oscuridad. Se sostenía casi como verdad inapelable que los efectos de las hormonas sólo podían obsevarse en células intactas. Pero Rall y Sutherland, que estaban estudiando cómo la hormona adrenalina (epinefrina) estimulaba las células hepáticas para que liberasen glucosa, no pensaban así, sosteniendo más bien que, para llegar a entender un sistema, hay que comprender sus componentes.

El análisis de los fragmentos celulares que llevaron a cabo reveló que la adrenalina provocaba un cambio en una enzima de la membrana plasmática y la capacitaba para convertir el nucleótido adenosina trifosfato (ATP) en una sustancia hasta entonces desconocida, el AMP cíclico (adenosina–3',5'–monofosfato cíclico). La enzima en cuestión era otra molécula, también desconocida hasta entonces, a la que se dio el nombre de adenil ciclasa (y hoy se denomina adenilil ciclasa).

Ateniéndonos a la terminología actual, lo que descubrieron fue que un primer mensajero (la adrenalina o epinefrina) actúa en parte a través de la estimulación de un efector (la adenilil ciclasa) y le insta a que produzca un segundo mensajero (el AMP cíclico). Los pasos intermedios entre la señal desencadenada por la adrenalina en el exterior de la célula y la activación de la adenilil ciclasa continuaban, sin embargo, sumidos en la oscuridad.

Sutherland pensó que la adenilil ciclasa y el receptor de la adrenalina podrían ser la misma molécula, lo que hubiera significado que el receptor haría también las veces de efector, sin necesidad de ningún otro intermediario. Así sucede en algunas vías concretas; pero experimentos realizados a comienzos de los años setenta dejaron bien claro que el receptor de la epinefrina y la adenilil ciclasa eran, de hecho, dos entidades distintas.

Siendo esto así, ¿cómo se comunica el receptor con la adenilil ciclasa? Dos pistas importantes sugerían que los nucleótidos de guanina andaban de por medio, lo que permitió abrir un nuevo frente de investigación, que terminó por conducir al descu-



Descubrimiento de la proteína G_s

Las condiciones del experimento de Elliott M. Ross, del laboratorio de Gilman, consistían en añadir un extracto de proteínas de membrana a membranas cyc⁻ (*izquierda, 1*), que se suponía carecían de adenilil ciclasa, la enzima que sintetiza AMP cíclico (2). La adrenalina provocó la producción de AMP cíclico por parte de las membranas deficitarias, lo que parecía indicar que la adenilil ciclasa (*verde*) se había insertado en ellas. En la situación de control, se destruía la adenilil ciclasa presente en el extracto (*centro, 1*). Pero, aun sin ella, la adrenalina consiguió que las membranas cyc⁻ produjeran AMP cíclico (2). Este resultado sorprendente condujo al descubrimiento de que las membranas cyc⁻ siempre habían contenido adenilil ciclasa (*derecha, 1*), pero carecían de un tercer componente necesario para activarla, una proteína G (*esferas rojas*), que persistía en el extracto aun después de haber eliminado la adenilil ciclasa. Fue la incorporación de proteína G a las membranas lo que permitió a la adenilil ciclasa oculta producir AMP cíclico (2) en la situación de control.

brimiento de la importancia de las proteínas G en la transducción de señales. En primer lugar, Martin Rodbell, Lutz Birnbaumer y sus colaboradores, que trabajaban en los Institutos Nacionales de Sanidad estadounidenses (N.I.H.), demostraron que la presencia de la hormona glucagón (que también ejerce efectos a través de la adenilil ciclasa) y de su receptor no era suficiente para activar la adenilil ciclasa; tenía que estar presente también el nucleótido guanosina trifosfato (GTP) .

Luego, Danny Cassel y Zvi Selinger, de la Universidad Hebrea, descubrieron que, cuando se añadía adrenalina a fragmentos de membrana plasmática, no sólo se activaba la adenilil ciclasa, sino que se provocaba también la conversión del GTP en guanosina difosfato (GDP). La conversión se producía porque una enzima llamada GTPasa hidrolizaba el GTP (es decir, rompía la molécula, al facilitar la interacción del agua con ella), con la consiguiente liberación de uno de sus tres fosfatos. La identidad de la GTPasa y la función específica del GTP habrían de tardar en esclarecerse. Pero, al menos, ambos resultados indicaban que los nucleótidos de guanina participaban en la transmisión de la señal de la adrenalina.

A mediados de los años setenta, Gilman y Elliott M. Ross, que entonces trabajaba en su laboratorio, se encontraban entre los investigadores intrigados por el problema de las conexiones entre receptores de adrenalina, GTP y adenilil ciclasa. Coincidían con Randall y Sutherland en pensar que la mejor manera de llegar a comprender el funcionamiento de un sistema biológico era desmembrarlo y recomponerlo de nuevo. Les hubiera gustado aislar las distintas proteínas vinculadas con la membrana plasmática para después añadirlas sistemáticamente a una membrana artificial, o desprenderlas de ella. Así hubieran podido desenmascarar el conjunto mínimo de moléculas necesario para la activación de la adenilil ciclasa y hubieran podido identificar el papel del GTP en la secuencia de reacciones que integran el proceso.

Por aquellos años, sin embargo, no se disponía de técnicas que permitiesen purificar con facilidad los componentes de la membrana sin alterarlos, razón por la cual Gilman y Ross se dispusieron a ir probando diversas técnicas para tratar de incrustar proteínas en membranas sin una previa purificación del material insertado. La suerte les acompañó y, en tales tentativas, encontraron la solución del problema de la señalización.

Ross había diseñado un experimento para ver si podía restaurar la adenilil ciclasa en una línea de células mutantes que conservaban los receptores de adrenalina pero que, al parecer, eran incapaces de producir adenilil ciclasa (*véase el recuadro*). Gordon M. Tomkins, ya fallecido, Henry R. Bourne y Philip Coffino, de la Universidad de California en San Francisco, habían descubierto esas células deficientes, o cyc⁻, en 1975.

Ross confiaba insertar la adenilil ciclasa en membranas cyc⁻ al mezclarlas con un extracto de proteínas derivadas de membranas que sí la contenían. Si lo conseguía, el segundo mensajero, el AMP cíclico, se produciría al exponer las membranas cyc⁻ tratadas a la adrenalina (así como al ATP y GTP, elementos que se habían demostrado imprescindibles para la producción del segundo mensajero). Y, efectivamente, cuando hizo la prueba, apareció el AMP cíclico.

Naturalmente, se quedó bastante satisfecho con este logro técnico. Pero los resultados de su experimento control resultaron ser aún más satisfactorios.

En las condiciones prefijadas del control, Ross inactivaba de manera inequívoca la adenilil ciclasa del extracto mediante un calentamiento suave, o por adición de compuestos químicos. Supuso que la mezcla de proteínas no tendría entonces efecto

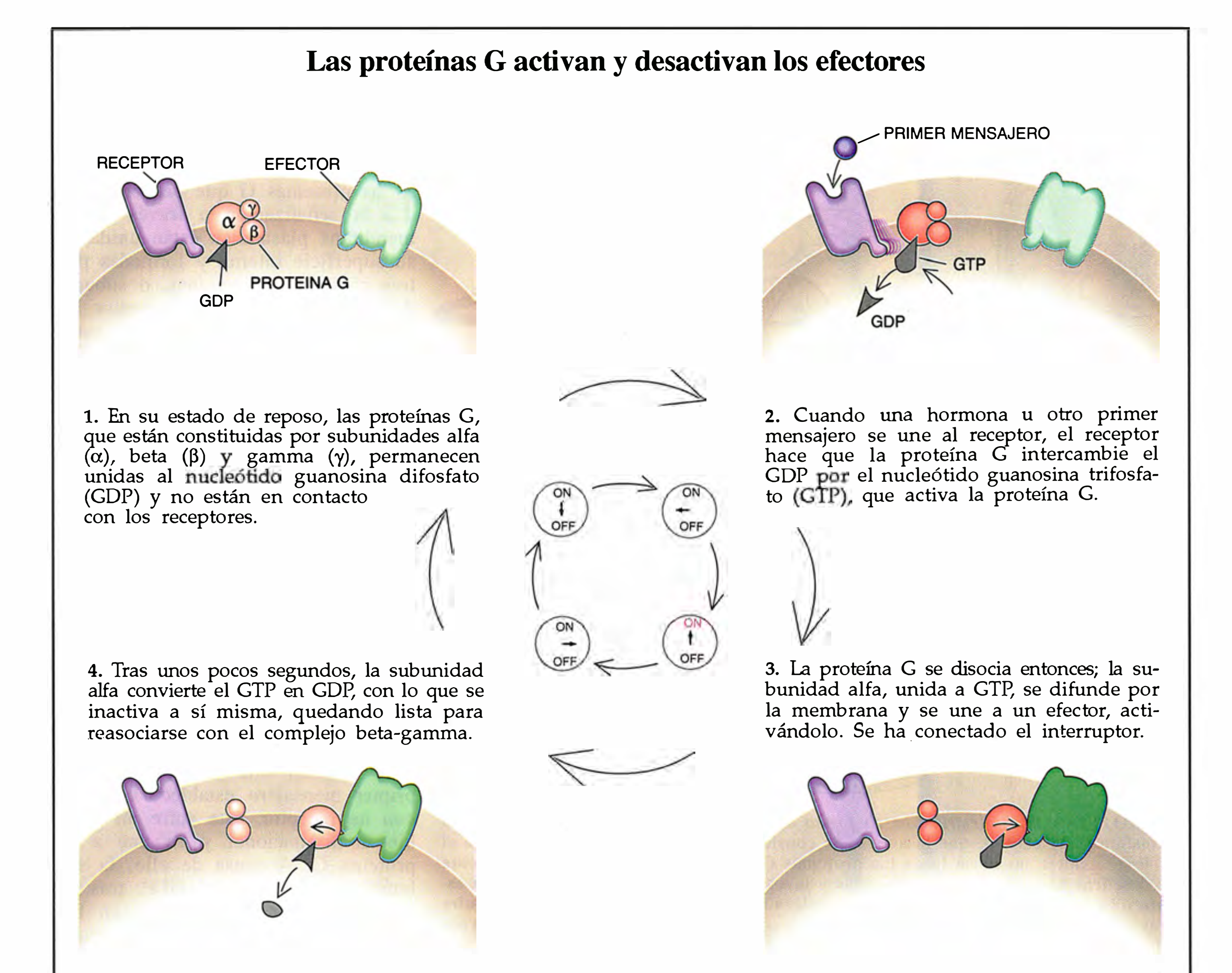
sobre la actividad de las membranas cyc⁻. En otras palabras, después de su exposición al extracto, las membranas continuarían sin adenilil ciclasa y, por tanto, no debería producirse respuesta alguna a la adrenalina, ATP y GTP. No sucedió así, y las membranas sintetizaron de manera inesperada AMP cíclico, exactamente como si hubiesen adquirido adenilil ciclasa activa del extracto.

La explicación de este hallazgo sorprendente se alcanzó muy pronto: las células cyc⁻ contienen en realidad adenilil ciclasa, pero había pasado inadvertida porque estaba inactiva. Y estaba inactiva porque otro componente celular —una adenilil ciclasa necesaria para su activación— estaba ausente de las células. Por fortuna, ese componente permaneció en el extracto después de que fuera eliminada la adenilil ciclasa, y su presencia "despertó" la enzima que permanecía dormida en las células cyc⁻.

Ross y Gilman demostraron enseguida que la sustancia activadora era una proteína que, a su vez, se activaba gracias al GTP. En vez de referirse a ella con el complicado nombre de "proteína ligadora de nucleótidos de guanina", la llamaron simplemente proteína G. No hizo falta mucha imaginación para deducir que la adrenalina llevaba a la producción de AMP cíclico transmitiendo información, mediante su receptor, a una proteína G, que, cuando se une a GTP, estimularía a la adenilil ciclasa para que convirtiera el ATP en AMP cíclico.

Hacia 1980, Paul C. Sternweis y John K. Northup, miembros entonces del laboratorio de Gilman, consiguieron purificar la proteína G que activa la adenilil ciclasa, conocida ahora como G_s. Después, una vez logrado el aislamiento del receptor de adrenalina y la adenilil ciclasa, Gilman y Ross prepararon membranas celulares artificiales constituidas por las tres proteínas incrustadas en fosfolípidos, los componentes estructurales principales de las membranas plasmáticas. Cuando se añadieron la adrenalina, el ATP y el GTP, se produjo el AMP cíclico.

Así pues, a mediados de esa década, este experimento constituyó la prueba concluyente de que todos los elementos esenciales de la vía que va desde la adrenalina hasta la producción del segundo mensajero, el AMP cíclico, habían quedado identificados. Hacia las mismas fechas, otros investigadores habían averiguado ya que el AMP cíclico activa quinasas de proteína, enzimas que fosforilan (añaden grupos fosfato) a otras proteínas. Y habían completado el resto de la vía de la adrenalina en las células hepáticas, demostrando que el AMP cíclico pone en marcha una cascada enzimática que, al final,



Las proteínas G activan y desactivan los efectores

1. En su estado de reposo, las proteínas G, que están constituidas por subunidades alfa (α), beta (β) y gamma (γ), permanecen unidas al nucleótido guanosina difosfato (GDP) y no están en contacto con los receptores.

2. Cuando una hormona u otro primer mensajero se une al receptor, el receptor hace que la proteína G intercambie el GDP por el nucleótido guanosina trifosfato (GTP), que activa la proteína G.

3. La proteína G se disocia entonces; la subunidad alfa, unida a GTP, se difunde por la membrana y se une a un efector, activándolo. Se ha conectado el interruptor.

4. Tras unos pocos segundos, la subunidad alfa convierte el GTP en GDP, con lo que se inactiva a sí misma, quedando lista para reasociarse con el complejo beta-gamma.

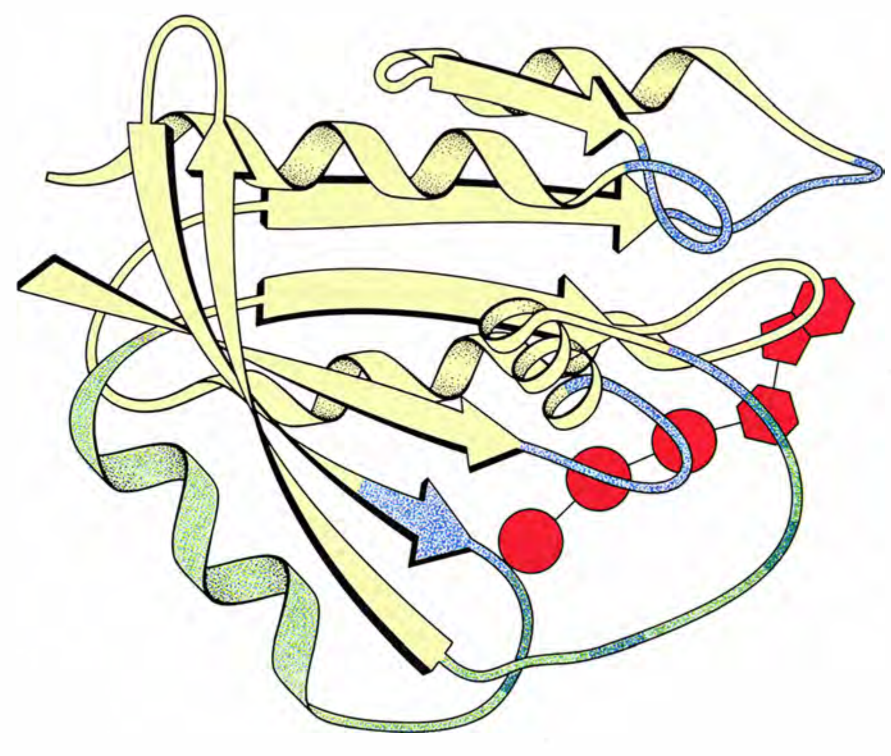
activa la fosforilasa, la enzima que rompe el glucógeno (el almidón animal) convirtiéndolo en glucosa. En otros tipos de células, el AMP cíclico, aun actuando a través de las mismas quinasas, ocasiona efectos diferentes, como puede ser la síntesis y liberación de hormonas esteroideas por las glándulas suprarrenales y las gónadas.

No resulta inusual en la actividad científica que, casi al mismo tiempo que Gilman y sus colaboradores estrechaban el cerco sobre la G_s como activador de la adenilil ciclasa, otros investigadores estuviesen a punto de hacer un descubrimiento semejante mientras estudiaban un problema de apariencia muy diversa: el mecanismo de respuesta a la luz de los bastoncillos de la retina. Los experimentos de Marck W. Bitensky, entonces en la Universidad de Yale, e, independientemente, los de Lubert Stryer y sus colaboradores, de la Universidad de Stanford, revelaron una segunda proteína G, conocida ahora como transducina, o G_t.

Esta proteína hace el papel de intermediario entre el receptor de la luz (rodopsina) y una enzima efectora (fosfodiesterasa), que regula los niveles de un segundo mensajero (guanosina-3',5'-monofosfato, o GMP cíclico). Cuando la rodopsina recibe el impacto de los fotones, activa la G_t, que instruye a la fosfodiesterasa para que convierta el GMP cíclico en GMP. Como el GMP cíclico mantiene abiertos los canales de sodio, su conversión en GMP los cierra, evitando la entrada de iones sodio (Na^+). Aumenta entonces la carga negativa del interior de la célula, haciendo que se hiperpolarice y genere una señal eléctrica, que se transmite hasta el cerebro. El extraordinario paralelismo entre la estimulación hormonal de la adenilil ciclasa y la activación de la fosfodiesterasa por la luz despertaron pronto el interés de otros investigadores, que se unieron a la búsqueda de nuevas proteínas G. La época de la recolección no llegó, empero, hasta 1984, fecha en que se clonaron los primeros miembros de la familia. Melvin Simon y sus colaboradores del Instituto Tecnológico de California han sido especialmente prolíficos en el aislamiento de genes de nuevas proteínas G, hasta tal punto que ahora asignan números en vez de nombres a los recién llegados.

Hasta ahora se han descubierto más de cien receptores (o quizá miles, si se incluyen los del olfato) que transmiten mensajes a través de proteínas G, de las que se han aislado al menos veinte formas distintas. Lo mismo sucede con los efectores dependientes de ellas; además de la adenilil ciclasa y la fosfodiesterasa del GMP cíclico, existen otras enzimas y canales de membrana que regulan el paso de iones inorgánicos a través de la célula. Una de estas enzimas, la fosfolipasa C, tiene un interés especial, ya que rompe un fosfolípido de la membrana plasmática y lo convierte en dos segundos mensajeros, uno de los cuales libera los depósitos internos de otro segundo mensajero más, el calcio.

A medida que se tomaba conciencia de la importancia de las proteínas G en la casi totalidad de las células, se hizo más urgente la necesidad de comprender cómo regulan el flujo de información entre receptores y efectores. Pocos años después del descubrimiento de G_s y de la transducina, ya se había conseguido esclarecer su mecanismo de operación.

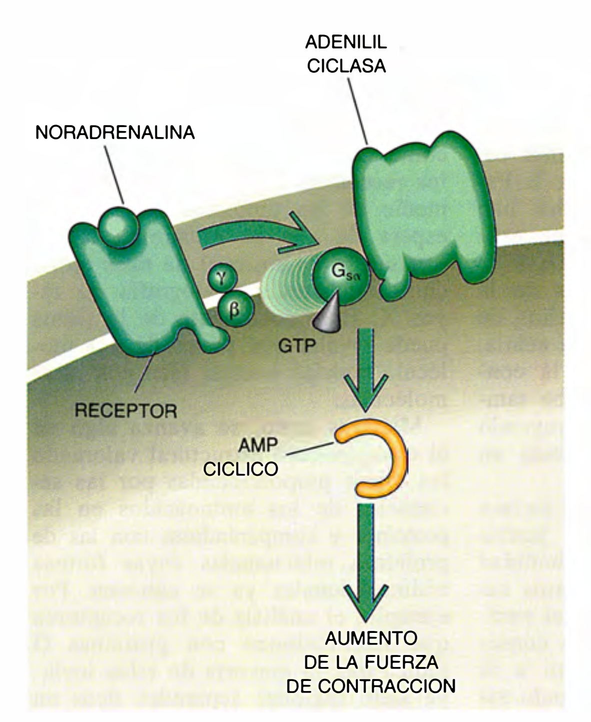


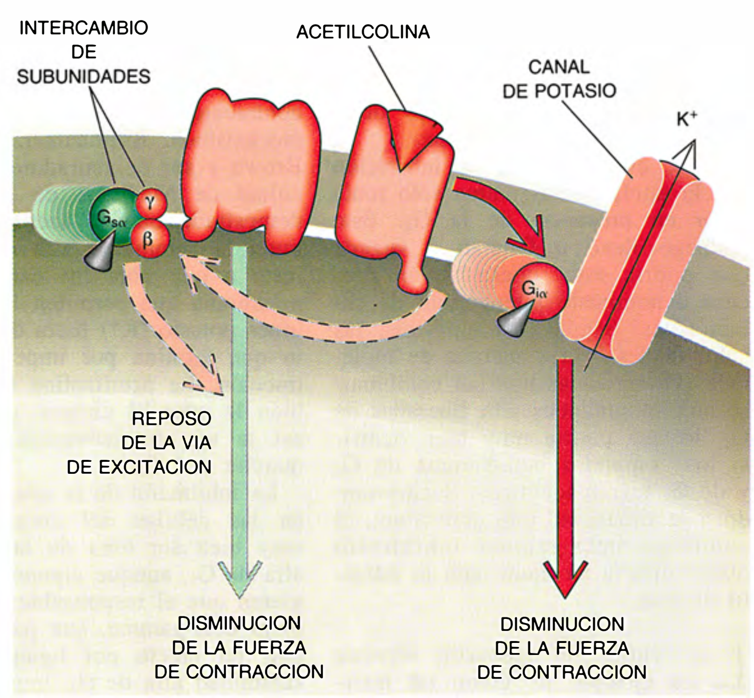
2. PROTEINA P21^{ras} (*estructura en forma de cinta*) unida al nucleótido guanosina trifosfato (GTP) (*rojo*), que la activa. Se considera que la región del ras que liga el GTP se asemeja mucho a la de las proteínas G transductoras de señales, pendiente de descifrar todavía. Los rizos, flechas y lazos indican, respectivamente, que su espinazo es helicoidal, extendido o de naturaleza menos estereotipada. Las áreas azules convierten el GTP en GDP, lo que provoca un cambio de forma de las regiones verdes y la inactivación de la molécula. (Las áreas verde-azuladas interactúan con los nucleótidos y cambian de forma.) Alfred Wittinghofer, del Instituto Max Planck de Investigaciones Médicas de Heidelberg, y Sung-Hou Kim, de la Universidad de California en Berkeley, determinaron esta estructura.

Las proteínas G que participan en la señalización a través de la membrana plasmática están unidas a su superficie interna y formadas por tres cadenas de proteínas, o subunidades, que de mayor a menor se denominan alfa (α), beta (β) y gamma (γ). La subunidad alfa difiere en cada una de las proteínas aisladas hasta la fecha. El par constituido por las subunidades beta y gamma no es necesariamente distinto; cadenas alfa diferentes pueden estar unidas a un par beta-gamma idéntico o diferente. Hasta ahora se han encontrado cinco estructuras diferentes de la subunidad beta y posiblemente más de diez de la gamma, lo que sugiere que podrían darse hasta más de mil combinaciones de alfa, beta y gamma.

Las proteínas G llevan a cabo sus funciones de una manera curiosa. En estado de reposo, las cadenas alfa, beta y gamma forman un complejo, y el GDP está unido a la subunidad alfa. Cuando una hormona u otro primer mensajero establece contacto con un receptor, éste sufre un cambio conformacional y se une a la proteína G. A causa de ello, la subunidad alfa libera el GDP, tras lo que el GTP, más abundante en las células, se une al lugar de ligamiento que queda abierto, alterando la forma de la subunidad alfa y activándola.

En esta condición, la subunidad





VIAS DE EXCITACION

VIAS DE INHIBICION

3. LA VIA EXCITADORA de las células del miocardio (*flechas verdes a la izquierda*) podría resultar parcialmente inhibida por el proceso de intercambio de subunidades (*a la izquierda de la ilustración derecha*). Las células del corazón se excitan y aumenta su fuerza de contracción cuando la $G_{s\alpha}$, la subunidad alfa de la proteína G_s, activa la adenilil ciclasa (*ilustración izquierda*). La fuerza disminuye (*flechas rojas de trazo continuo*) cuando la acetilcolina insta a la subunidad alfa de G_i (*esfera roja grande*) para que abra los canales que permiten la salida de iones de potasio (K^+) de la célula. El intercambio de subunidades de G_i provocaría un nueva disminución (*flechas rojas de trazo interrumpido*) si las subunidades beta y gamma de G_i (*pareja de esferas rojas*) se combinasen con la subunidad alfa de G_s, bloqueando así su acción sobre la adenilil ciclasa.

alfa unida al GTP se disocia de las beta y gamma, difundiéndose por la superficie interna de la membrana plasmática hasta que se engancha con un efector, como pueda ser la adenilil ciclasa. Escasos segundos después, la subunidad alfa hidroliza el GTP para formar GDP, con lo que se desactiva a sí misma, comportamiento que explica por qué Cassel y Selinger detectaron en su tiempo actividad GTPasa en membranas plasmáticas estimuladas con adrenalina. Una vez que la subunidad alfa se torna inactiva, se disocia del efector y se reasocia con subunidades libres de beta y de gamma.

De aquí que las proteínas G hagan el oficio de interruptores y temporizadores, determinando cuándo y durante cuánto tiempo se abren o cierran las vías de comunicación. El interruptor conecta cuando la cadena alfa unida a GTP se une a un efector y desconecta cuando el GTP se hidroliza a GDP. La velocidad de hidrólisis establece el tiempo que transcurre entre conexión y desconexión.

Las proteínas G también amplifican señales. Por ejemplo, en el sistema visual, de eficacia tan portentosa, una molécula de rodopsina activa casi simultáneamente más de 500 moléculas de transducina. En el caso de G_s, una subunidad alfa unida a una molécula de adenilil ciclasa puede activar la síntesis de muchas moléculas de AMP cíclico antes de que el temporizador se interrumpa y el GTP se convierta de nuevo en GDP.

Resulta interesante el hecho de que la autohidrólisis del GTP regule también la actividad de muchas otras proteínas que no participan en la transducción de señales externas, proteínas que, junto con las transductoras, constituyen una superfamilia de GTPasas. Algunos de sus miembros participan en la síntesis de proteínas en los ribosomas; otros, sobre todo los productos de los genes *ras*, ayudan a controlar el ritmo de la división celular.

Es evidente que la subunidad alfa de las proteínas G transductoras de señales desempeña un papel fundamental en la transmisión de mensajes a los efectores, pero la cuestión de si el par beta-gamma los regula también es objeto de animado debate, habiendo quienes piensan que no. Nosotros nos encontramos entre los que han hecho acopio de datos que apoyan el punto de vista de que los complejos beta-gamma que permanecen unidos entre sí, y actúan como una unidad, pueden ser importantes en los procesos de señalización. Estudios realizados en nuestro laboratorio sugieren que la unidad beta-gamma afecta a algunas vías de señalización más que a otras, y que unas veces activa y otras inhibe. Por ejemplo, Wei-Jen Tang ha demostrado recientemente que la unidad beta-gamma puede cooperar con la alfa de G_s para activar formas particulares de la adenilil ciclasa. Y, al mismo tiempo, puede inhibir un tipo de adenilil ciclasa que se encuentra en algunas neuronas, probablemente ligándose directamente a esa enzima. Por contra, no parece tener efecto directo alguno sobre otros tipos de adenilil ciclasa.

En este último caso, el complejo podría ejercer a veces una influencia indirecta, lo que quizás explicase el misterio de cómo consigue su efecto la G_i, que interfiere con la capacidad de la adenilil ciclasa para generar AMP cíclico. Por analogía con la G_s y la transducina, Gilman y sus colaboradores sugirieron que la G_i, que ya habían descubierto en 1982, habría de inhibir la adenilil ciclasa mediante la liberación de su subunidad alfa. Sin embargo, cuando Northup y Toshiaki Katada, del mismo equipo investigador, midieron la capacidad de las proteínas alfa y beta-gamma

de la G_i para inhibir la adenilil ciclasa en membranas plasmáticas, se encontraron con que la proteína alfa era un inhibidor mucho más débil que el complejo beta-gamma.

Pero, curiosamente, la inhibición por la unidad beta-gamma sólo tenía lugar en presencia de la G_s. Este hallazgo llevó a Gilman a sugerir que podría estar operando un proceso denominado intercambio de subunidades. Según esta hipótesis, las subunidades beta y gamma de moléculas G_i activadas podrían combinarse con subunidades alfa liberadas de G_s, lo que podría muy bien ocurrir si los complejos beta-gamma de G_s y de G_i fueran idénticos. Secuestrando a la subunidad alfa activadora, el complejo beta-gamma inhibitorio obstaculizaría su unión con la adenilil ciclasa.

Las células del miocardio ofrecen un ejemplo de cómo tal intercambio de subunidades podría influir sobre las funciones celulares (*véase la ilustración 3*). El neurotransmisor noradrenalina aumenta la fuerza y el ritmo de la contracción a través de la subunidad alfa de G_s, adenilil ciclasa y AMP cíclico. Cuando el neurotransmisor acetilcolina actúa también sobre las células, bloquea la contracción, al parecer mediante dos mecanismos. Birnbaumer, Arthur M. Brown y sus colaboradores de la Facultad de Medicina de Baylor han demostrado que la acetilcolina estimula la subunidad alfa de G_i y le insta a que abra los canales de la membrana que permiten la salida de iones potasio (K^+) fuera de la célula, lo que termina por impedir la contracción. La acetilcolina inhibe también la adenilil ciclasa, obstruyendo así la vía de activación puesta en marcha por G_s.

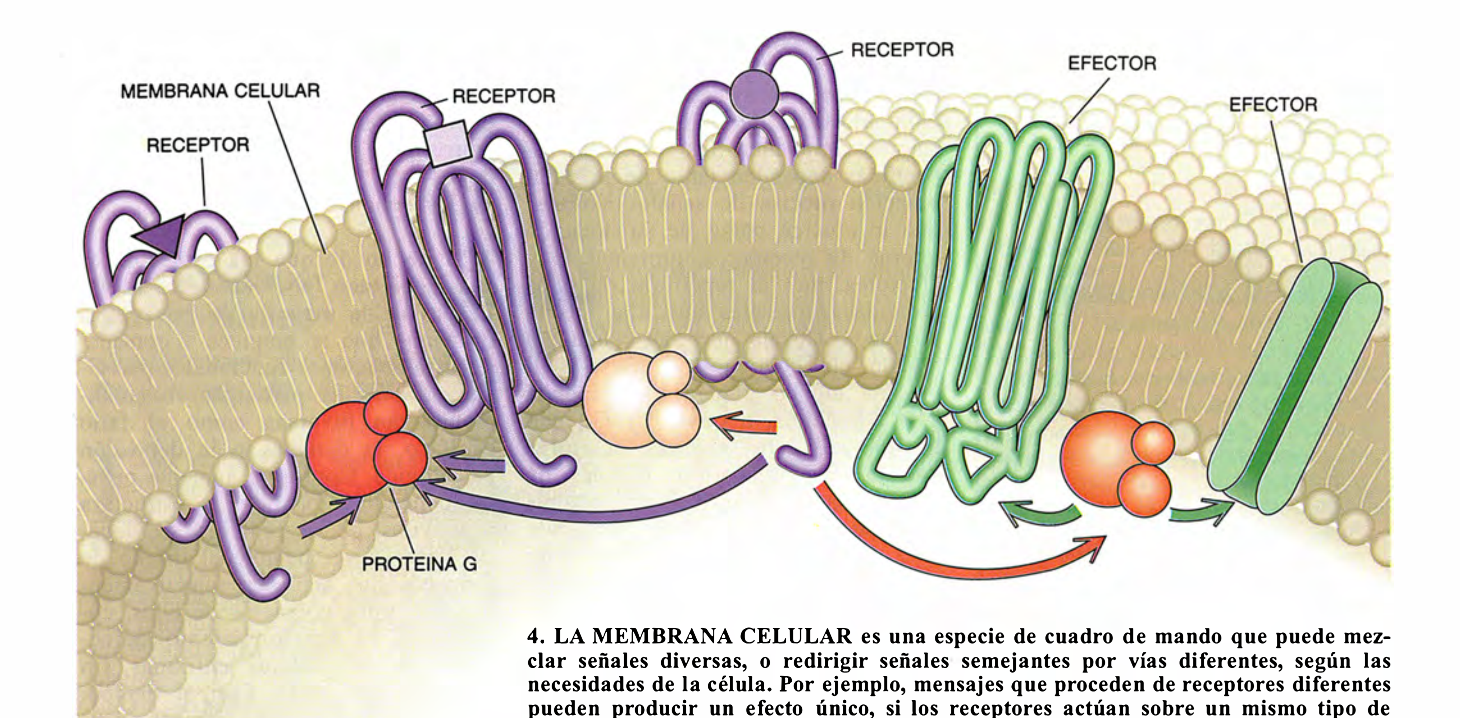
La inhibición de la adenilil ciclasa en las células del corazón podría muy bien ser obra de la subunidad alfa de G_i, aunque algunos datos sugieren que el responsable es el complejo beta-gamma, que podría conseguir tal efecto por ligamiento a la subunidad alfa de G_s, impidiendo así su acceso a la adenilil ciclasa. Nosotros no defendemos a toda costa el intercambio de subunidades en la célula, pero la hipótesis sigue viva por su congruencia con muchos datos experimentales y porque, hasta ahora, nadie ha demostrado que la subunidad alfa de G_i pueda inhibir directamente la adenilil ciclasa.

Una comprensión más detallada de cómo se transmiten las señales desde los receptores hasta los efectores por medio de las proteínas G está a la espera de que se esclarezca la estructura tridimensional de tales moléculas mediante cristalografía de rayos X. El conocimiento de la forma puede revelar qué partes de una molécula podrían encajar bien con otras moléculas.

Mientras tanto, se avanza algo en el conocimiento estructural valorando las pistas proporcionadas por las secuencias de los aminoácidos en las proteínas y comparándolas con las de proteínas relacionadas cuyas formas tridimensionales ya se conocen. Por ejemplo, el análisis de los receptores que interaccionan con proteínas G indica que la mayoría de ellos incluye siete regiones separadas ricas en aminoácidos hidrofóbicos. Estos segmentos abarcan casi con seguridad todo el espesor de la membrana plasmática, que es hidrofóbico (huyendo así del medio acuoso del citoplasma), y crean una oquedad accesible

Ejemplos de efectos fisiológicos mediados por proteínas G

ESTIMULO	TIPO CELULAR AFECTADO	PROTEINA G	EFECTOR	EFECTO
Adrenalina, glucagón	Células hepáticas	G_s	Adenilil ciclasa	Degradación de glucógeno
Adrenalina, glucagón	Adipocitos	G_s	Adenilil ciclasa	Lipolisis
Hormona luteinizante	Folículo ovárico	G_s	Adenilil ciclasa	Aumento de la síntesis de estrógeno y progesterona
Hormona antidiurética	Células renales	G_s	Adenilil ciclasa	Conservación de agua por el riñón
Acetilcolina	Células del miocardio	G_i	Canal de potasio	Descenso del ritmo cardiaco y de la fuerza de contracción
Encefalinas, endorfinas, opioides	Neuronas cerebrales	G_i/G_o	Canales de calcio y de potasio, adenilil ciclasa	Cambio de actividad eléctrica de las neuronas
Angiotensina	Células musculares lisas de los vasos sanguíneos	G_q	Fosfolipasa C	Contracción muscular; elevación de la presión sanguínea
Olores	Células neuroepiteliales de la nariz	G_{olf}	Adenilil ciclasa	Detección de olores
Luz	Conos y bastones de la retina	G_t	Fosfodiesterasa de GMP cíclico	Detección de señales visuales
Feromona	Levadura de panadero	GPA1	Desconocido	Reproducción celular sexual



4. LA MEMBRANA CELULAR es una especie de cuadro de mando que puede mezclar señales diversas, o redirigir señales semejantes por vías diferentes, según las necesidades de la célula. Por ejemplo, mensajes que proceden de receptores diferentes pueden producir un efecto único, si los receptores actúan sobre un mismo tipo de proteína G (*flechas de color púrpura*). A la inversa, mensajes captados a través de un único receptor pueden producir más de una respuesta, si aquél actúa sobre tipos diferentes de proteínas G (*flechas rojas*), o si éstas lo hacen sobre efectores diferentes (*flechas verdes*).

a los primeros mensajeros por la cara extracelular de la membrana. Además, los segmentos citoplásmicos que conectan las regiones hidrofóbicas incluyen uno o más bucles que se supone se ligan a proteínas G específicas.

Nadie sabe todavía qué sitios de las proteínas G transductoras de señales establecen contacto con los receptores, ni cómo conectan entre sí las subunidades de una proteína G. Pero se tiene una idea bastante clara del lugar de unión de la subunidad alfa al GTP y al GDP y de su conformación en los estados activo e inactivo (*véase la ilustración 2*). Esta información se basa en la estructura cristalina de una proteína ras, que descifraron independientemente Alfred Wittinghofer, del Instituto Max Planck de Investigaciones Médicas, de Heiderlberg, y Sung-Hou Kim, de la Universidad de California en Berkeley. La parte de la proteína ras que liga el nucleótido de guanina se asemeja bastante a la de las proteínas G transductoras de señales.

A diferencia de los receptores, las proteínas G no parecen incluir regiones fuertemente hidrofóbicas, que servirían para explicar su modo de unión a la membrana plasmática. Sin embargo, Susanne M. Mumby y Patrik J. Casey, de nuestro laboratorio, y John A. Glomset y sus colaboradores, de la Universidad de Washington, han descubierto por separado una posible zona "pegajosa": un extremo de la proteína gamma está unido a una molécula lipídica de naturaleza isoprenoide. Nosotros pensamos que el lípido podría anclar la proteína G a la membrana celular, por la sencilla razón de que, al igual que la membrana fosfolipídica, es hidrofóbico. También pudiera ser que el isoprenoide ayudase a las proteínas G a unirse a otras proteínas de la membrana. Las subunidades alfa de algunas proteínas G transductoras de señales es probable que se unan además a la membrana con la ayuda de un segundo lípido, el ácido mirístico.

Es muy poco lo que se sabe acerca de las conformaciones de los efectores que constituyen el blanco de las proteínas G, aunque en nuestro laboratorio hemos avanzado algo en relación con la adenilil ciclasa. Basándonos en la secuencia de aminoácidos de varias de estas moléculas, proponemos que la adenilil ciclasa asume una forma un tanto compleja: 12 segmentos transmembrana forman colectivamente un túnel, que se asemeja a los canales por los que los iones entran o salen de la célula. Dos dominios hidrofílicos residentes en el citoplasma son necesarios para la síntesis de AMP cíclico. Por el momento, sólo podemos conjeturar el porqué de estructura tan complicada. Quizá la adenilil ciclasa sea algo más que una enzima y sirva también como transportador de cierto tipo.

Hasta aquí nos hemos centrado fundamentalmente en las vías individuales de la transducción de señales; sin embargo, la complejidad de la actividad en el miocardio es un caso que sugiere que las vías de señalización por proteínas G se influyen recíprocamente.

Si las vías convergen, como ocurre cuando diferentes receptores actúan sobre el mismo tipo de proteína G o cuando diversas proteínas G actúan sobre un solo efector, la célula puede producir la misma respuesta (aunque con gradaciones) frente a primeros mensajeros distintos. Por el contrario, si divergen, caso de un tipo de receptor actuando sobre diferentes tipos de proteínas G o de una proteína G que incida sobre más de un efector, la célula puede presentar varias respuestas concurrentes ante un mensaje externo único. La capacidad que tienen los receptores, proteínas G y efectores de interactuar con más de una especie de moléculas en el interior de la célula significa también que ésta puede enviar la señal a través de una vía determinada, en una circunstancia, mientras que, en otra, lo hará por una diferente.

Resulta indudable que la membrana celular es un cuadro de mando de gran complejidad, que recibe una di-

versidad de señales, valora su fuerza relativa y las transmite a segundos mensajeros que asegurarán la reacción adecuada de la célula ante un entorno cambiante. Sus respuestas específicas dependen tanto de la combinación precisa de señales externas que le afecten como de su dotación interna de receptores, proteínas G y efectores, más el repertorio de otras proteínas especiales que ella misma produzca. De ahí que una célula del hígado, que contiene fosforilasa y almacena mucho glucógeno, responda a la adrenalina, a través de G_s, con la liberación de glucosa, mientras que las del miocardio, dotadas de canales especializados y productoras de proteínas contráctiles, reaccionen ante el mismo estímulo, mediado también por G_s, contrayéndose con mayores fuerza y frecuencia.

El esclarecimiento de los mecanismos de señalización a través de las membranas produce una indudable satisfacción intelectual, pero estas exploraciones tienen también su vertiente práctica. Estudios de vías de señalización determinadas, dependientes de las proteínas G, ya han enriquecido nuestros conocimientos sobre varias enfermedades, lo que representa un primer paso hacia su tratamiento racional.

La bacteria responsable del cólera segrega una toxina que penetra en las células intestinales, donde obstaculiza la conversión del GTP en GDP por parte de la subunidad alfa de G_s. La toxina impide así que la G_s se desactive. El resultado es que las células acumulan un exceso de AMP cíclico, lo que las hace segregar grandes cantidades de electrólitos y agua a la luz intestinal. La grave diarrea que se produce lleva a una deshidratación que puede ser letal.

La bacteria que produce la tos ferina elabora una toxina afín, que impide que los receptores activen la G_i. Sin un inhibidor, la vías permanecen activas durante un tiempo igualmente excesivo. Esta toxina afecta a muchos tipos de células, lo que puede que contribuya a la inmunodeficiencia que a veces acompaña a esa tos tan característica.

En fin, mutaciones de las proteínas G, entre ellas las G_s y G_i, parecen participar en el desarrollo de algunos cánceres. Por ejemplo, Bourne y sus colaboradores, en San Francisco, han encontrado, en células de algunos tumores hipofisiarios, mutaciones en el gen que especifica la subunidad alfa de G_s. Tales mutaciones la hacen actuar sobre los efectores durante minutos, en vez de segundos, lo que puede promover una replicación excesiva de las células hipofisiarias. Algo parecido, pero más habitual, son los defectos que reducen la capacidad de las proteínas ras para convertir GTP en GDP, cuyo resultado es una proliferación incontrolada de las células.

El hecho de que las proteínas G gobiernen funciones tan especializadas de la mayoría de las células ha hecho que se empiece a considerar si alteraciones funcionales parecidas no podrían participar en condiciones tan diversas como el fallo cardíaco, la diabetes o la depresión psicológica. Conforme aumente nuestro conocimiento sobre la estructura y actividad de las proteínas G, debería llegar a ser posible el diseño de fármacos que actuasen selectivamente sobre tipos concretos de ellas, corrigiendo el funcionamiento defectuoso de las células enfermas sin afectar a las sanas. Con el tiempo, acabará compilándose un mapa completo de la membrana plasmática para cada uno de los miles de tipos celulares del organismo humano. En cada caso se sabrá cómo se relacionan entre sí las docenas de receptores, proteínas G y efectores diversos. Y podrá predecirse cómo reaccionarán las células en respuesta a cualquier combinación de señales. Medio en broma, alguien ha dicho que esto representaría para quienes se afanan en el desarrollo de nuevos fármacos lo que para un ladrón recibir el esquema completo del sistema de alarma de un banco.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

G PROTEINS: TRANSDUCERS OF RECEPTOR-GENERATED SIGNALS. Alfred G. Gilman en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 56, págs. 615-649; 1987.

THE GTPase SUPERFAMILY: A CONSERVED SWITCH FOR DIVERSE CELL FUNCTIONS. Henry R. Bourne, David A. Sanders y Frank McCormick en *Nature*, vol. 348, n.º 6297, págs. 125-132; 8 de noviembre de 1990.

THE GTPase SUPERFAMILY: CONSERVED STRUCTURE AND MOLECULAR MECHANISMS. Henry R. Bourne, David A. Sanders y Frank McCormick en *Nature*, vol. 349, n.º 6305, págs. 117-127; 10 de enero de 1991.

DIVERSITY OF G PROTEINS IN SIGNAL TRANSDUCTION. Melvin I. Simon, Michael P. Strathmann y Narasimhan Gautam en *Science*, vol. 252, págs. 802-808; 10 de mayo de 1991.

STRUCTURE AND FUNCTION OF SIGNAL-TRANSDUCING GTP-BINDING PROTEINS. Y. Kaziro, H. Itoh, T. Kozasa, M. Nakafuku y T. Satoh en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 60, págs. 349-400; 1991.

Ciencia y sociedad

Interacciones manto-núcleo

Simulaciones en las celdillas de yunques de diamante

Las celdillas de yunques de diamante permiten simular en el laboratorio las condiciones físicas que reinan en el límite entre el núcleo y el manto terrestres. A ellas se recurre para descender hasta las entrañas de la Tierra y para remontarse hasta los orígenes de nuestro planeta.

Los sismólogos que investigan la estructura interna de la Tierra saben que consta de capas sucesivas diferenciadas por su naturaleza física y su composición química. Dos capas principales constituyen nuestro planeta: una rocosa, formada por silicatos sólidos, que abarca desde la superficie hasta 2900 kilómetros de profundidad (los primeros kilómetros son la corteza sobre la que vivimos, a continuación viene el manto); la otra, el centro de la Tierra, o núcleo, de 2900 a 6370 kilómetros de profundidad, que está ocupado por hierro, principalmente líquido.

CORTEZA
MANTO
CAPA D''
NUCLEO

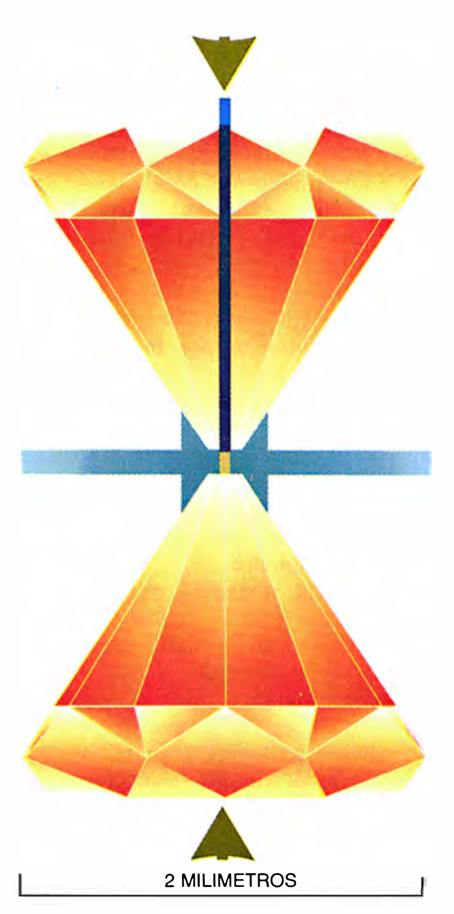
Corte esquemático de la Tierra. Por encima del límite núcleo-manto se encuentra la zona anormal estudiada, llamada capa D''.

La interfase situada a 2900 kilómetros se caracteriza por una formidable discontinuidad de todas las propiedades físicas y químicas. Por un lado, una roca sólida, eléctricamente aislante, animada de movimientos plásticos muy lentos (normalmente del orden de un centímetro por año). Por el otro, hierro en estado de fusión, líquido, conductor eléctrico, fuente de nuestro campo magnético, puede que tan fluido como el agua. Estos cambios de medio y de densidad son comparables al paso entre la tierra sólida y la atmósfera.

Pero, ¿qué ocurre verdaderamente a 2900 kilómetros de profundidad? ¿Es grande y brutal el tránsito de silicato sólido (roca) a metal líquido? ¿Se presenta a lo largo de varios kilómetros, varias decenas de kilómetros, o abarca más distancia? ¿Acaso el metal líquido del núcleo invade la base del manto? ¿Reaccionan químicamente los dos medios uno sobre otro o, por el contrario, la interfase es inerte? El análisis de las ondas sísmicas que atraviesan esta zona y se recogen en la superficie nos informa de que, en el lado del límite correspondiente al manto, existe una zona anormal, llamada capa D''. En el laboratorio puede simularse el límite núcleo-manto e identificar propiedades características de esta interfase.

El experimento no es sencillo: las condiciones de presión y temperatura que se han de reproducir son extremas. A 2900 kilómetros de profundidad, nos dice la sismografía, existe una presión de 1,4 millones de atmósferas; la temperatura es del orden de 4000 °C. Desde hace unos años se consiguen en el laboratorio presiones y temperaturas de este orden gracias a las celdillas de yunques de diamante calentadas por láser. Se comprime una muestra entre las puntas de dos diamantes tallados: la extrema dureza del diamante permite que celdillas tan minúsculas resistan enormes contracciones; se crean así presiones superiores a las que hay en el centro de la Tierra (récord absoluto con celdillas de diamante: 5,5 millones de atmósferas).

La temperatura plantea más problemas, porque los diamantes no soportan el calentamiento sin arder. Se impone, pues, hallar un método para calentar únicamente la muestra y no destruir los diamantes que la rodean. La solución está en usar un láser de potencia, cuya radiación atraviesa los diamantes sin ser absorbida. Por el contrario, cuando atraviesa los granos de hierro o de silicatos, se absorbe, lo que provoca el calentamiento local deseado. Se alcanzan así temperaturas que sobrepasan los 6000 °C en muestras mantenidas al



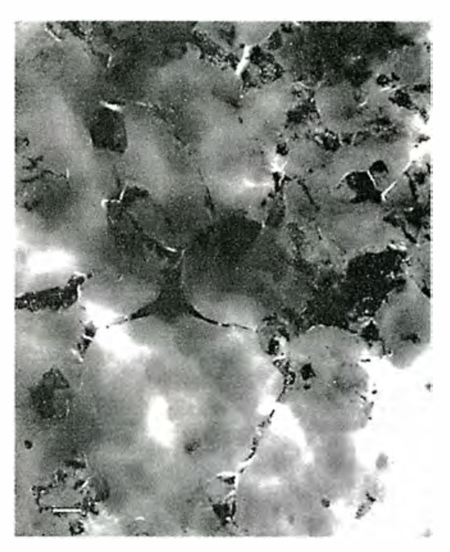
Celdilla de yunques de diamante que permite reproducir las condiciones de presión y temperatura que existen en el límite núcleo-manto.

tiempo bajo presiones características del manto inferior.

Hemos comprimido y calentado mezclas de polvos de silicatos (para simular las rocas de la zona del manto) y de hierro (para hacer lo mismo con la del núcleo). Así creamos una especie de micromaqueta del límite núcleo-manto. Había que observarlo con mayor detalle; los objetos producidos en estos experimentos son muy pequeños; su diámetro es el de la punta del diamante (normalmente 0,3 milímetros) y la compresión los convierte en finísimos discos (de unos 0,015 milímetros de espesor). Las técnicas analíticas, especialmente las de rayos X, han hecho enormes progresos y es posible aplicar numerosos métodos convencionales para el estudio de pequeños objetos mantenidos bajo presión entre los dos diamantes, que sirven para determinar las características globales de los compuestos.

¿Cómo penetra la fase metálica en el interior de la fase silicato? ¿Cómo interactúan ambos medios? Las respuestas se apoyan en la microscopía electrónica analítica de transmisión, que proporciona, en la escala de una decena de nanometros, las imágenes, la estructura cristalina y la composición química de las fases sintetizadas a presión y temperatura elevadas. La contrapartida a tan buenas prestaciones la encontramos en el hecho de que los análisis deben efectuarse obligatoriamente en condiciones normales de presión y temperatura. Cierto es que se trata de un engorro sólo relativo: los fenómenos interesantes, como la migración del metal líquido al silicato o los intercambios químicos entre las dos fases, se producen únicamente a altas temperaturas. El enfriamiento drástico de las muestras bajo presión (obtenido al apagar el láser) inmoviliza las características de alta presión y alta temperatura, que se mantendrán cuando se produzca la descompresión a temperatura ambiente.

En todos nuestros experimentos hemos observado la fusión del hierro y la invasión de la matriz de silicato por el hierro fundido: a alta presión el líquido metálico tiene la propiedad de humedecer fácilmente los granos de silicato; en consecuencia, es probable que el líquido procedente del núcleo se infiltre en la base del manto. Jean-Paul Poirier y Jean-Louis LeMoüel, del Instituto de Física del Globo (IPG) de París, han calculado que el líquido metálico penetra en la base del manto hasta un espesor de unos 100 metros suponiendo una "mojabilidad" perfecta. La convección del manto puede a continuación arrastrar esta capa infiltrada por el resto del manto, al tiempo que aporta material fresco, que se infiltrará nuevamente. Se trata, pues, de un posible mecanismo de mezcla del material del núcleo con el del manto. No es imposible que el núcleo ejerza así alguna influencia sobre la composición de las diferentes reservas terrestres, incluidas las más cercanas a la superficie.



El líquido metálico aparece en color oscuro. Ha penetrado en el silicato (más claro). *Esta propiedad que permite al líquido metálico penetrar entre los granos de silicato se denomina "mojabilidad". Hemos podido estudiar con precisión los intercambios químicos que se producen entre el silicato sólido y el líquido metálico.*

Los silicatos del manto terrestre contienen oxígeno y silicio, pero también magnesio, hierro y otros elementos en cantidades menores. Hemos analizado la conversión de los elementos químicos en el punto exacto de contacto entre el metal y el silicato. Una parte del hierro y del oxígeno abandonan el silicato para ir a la fase metálica y lo hacen en cantidades aproximadamente iguales, es decir, bajo la forma de FeO. Los silicatos que han estado en contacto con el metal de hierro a alta presión se empobrecen en FeO. Esta reacción química podría tener como consecuencia la formación, en el límite núcleo-manto, de zonas empobrecidas en FeO, de menor densidad que el material existente inmediatamente por encima, y que podrían elevarse en algunos centenares de kilómetros, explicando así parte de las propiedades geofísicas anormales de la capa D″.

La Tierra que conocemos, formada por una corteza, un manto y un núcleo, evolucionó, hace unos 4500 millones de años, a partir de un conjunto más bien homogéneo de granos de hierro y de roca existentes en la nebulosa presolar. Cuando el globo alcanzó tamaño suficiente, los choques violentos de acreción, así como el calor liberado por radiactividad, calentaron el planeta, de suerte que el metal fundido migró hacia el centro y formó el núcleo. El hierro líquido (puede que acompañado de azufre) se coló por medio de los silicatos (líquidos o sólidos); lo fundamental de este contacto se produjo en las profundidades del protoplaneta, es decir, a muy alta presión.

Las reacciones químicas puestas de manifiesto por nuestros experimentos muestran que este metal debió de enriquecerse en oxígeno. En consecuencia, el oxígeno así atrapado se convierte en importante constituyente ligero del núcleo terrestre, que permitiría bajar el punto de fusión del metal, explicando su estado fundido, y podría constituir un motor esencial para la generación de nuestro campo magnético. En cuanto a los silicatos del manto, el paso del metal líquido ha actuado como una auténtica "bomba de FeO" y probablemente los ha empobrecido en hierro. (François Guyot, del Instituto de Física del Globo de París.)

Estructura cósmica

Galaxias de tenue luminosidad

Las galaxias de baja luminosidad superficial (LSB) han salido del ostracismo en que se hallaban para pasar al primer plano del interés astronómico. Opinábase, hasta hace poco, que todas las galaxias LSB eran enanas. Apenas estructuradas y de reducido tamaño, se les concedía un papel secundario en la composición del universo. Pero las cosas han cambiado desde que se han puesto de relieve sus peculiaridades sorprendentes.

El giro empezó en 1987, cuando el equipo de Gregory D. Bothun, de la Universidad de Oregon, analizó las emisiones de radio procedentes de una galaxia enana de la constelación de Virgo. No tardaron en advertir que el objeto se hallaba a una distancia 10 veces superior de lo supuesto. Lejos de tratarse de una enana, Malin 1, nombre de la galaxia, posee una masa un billón de veces la solar y ocupa un espacio que dobla el diámetro de la Via Láctea.





La galaxia de baja luminosidad (izquierda) alcanza el mismo tamaño y masa que la galaxia normal (derecha), pero aloja un número muy inferior de estrellas. Fotografías de Patricia Knezek.

Una galaxia enorme acababa de descubrirse por casualidad.

Sabiendo ya hacia dónde orientarse, los astrónomos han encontrado más galaxias LSB enormes, aunque difíciles de ver. El último otoño, el propio Bothun descubría otra, a la que puso el nombre provisional de Malin 2.

Los dedicados al estudio de la formación y evolución de las galaxias han de reconocer que podrían haber estado dejando de lado una parte sustantiva de su objeto de inquisición. Mas, ¿por qué estas galaxias difieren tanto de las "normales", que despiden una intensa luminosidad superficial? Bothun cree que muchas de las galaxias enanas LSB son objetos pálidos cuyas estrellas detuvieron su proceso de desarrollo hace mucho tiempo.

Por otra parte, las galaxias gigantes LSB parecen objetos en los cuales nunca se formaron muchas estrellas. Stephen E. Schneider, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, llama la atención sobre el azul intenso de los discos de estas galaxias, signo de estrellas que son jóvenes y con pocos elementos pesados. Las estrellas viejas poseen, por contra, un color rojizo. El análisis espectral, llevado a cabo por Stacy S. McGaugh de la Universidad de Michigan, Bothun y otros, confirma que las galaxias LSB grandes contie-

nen sólo débiles trazas de los elementos creados durante la evolución estelar.

Los núcleos de las galaxias gigantes LSB alojan gruesos enjambres de estrellas que se parecen (en color y luminosidad) a las de los núcleos de las galaxias normales. En esas densas regiones centrales, las estrellas evolucionan según lo acostumbrado. Ciertamente, Malin 2 no aparece en ningún catalogo de galaxias, en parte porque su núcleo brillante recuerda el de una estrella, mientras que su mortecino disco externo se detecta sólo después de una ardua búsqueda. La observación demuestra que, en las galaxias LSB grandes, el color azul aumenta en las zonas alejadas del núcleo; o lo que viene a ser lo mismo: el proceso de formación estelar migra lentamente hacia el exterior galáctico.

De acuerdo con todos los indicios, las regiones más externas del disco de las galaxias LSB gigantes no han evolucionado de la misma forma en que lo han hecho zonas homólogas de galaxias más comunes, como la nuestra. Asimismo, es de señalar la reducida densidad superficial de tales galaxias, hasta el punto de que el hidrógeno pudiera permanecer en forma atómica. En ese caso, es imposible que las nubes de hidrógeno se fragmenten y se colapsen para constituir estrellas. Eso podría suceder en Malin 1, si bien algunas de las galaxias LSB descubiertas recientemente manifiestan una densidad normal.

Las LSB gigantes tienden a situarse lejos de cualquier otra galaxia, lo que no favorece la interacción con las vecinas, desencadenantes de ondas gravitatorias que comprimen el gas de hidrógeno y promueven la formación estelar. La ausencia de interacciones gravitatorias externas ayuda a entender la parvedad estelar de Malin 1 y de otras galaxias de su estirpe.

En las regiones externas de Malin 2 se divisan estrellas en formación, distribuidas en racimos, cada uno de los cuales viene a reproducir una galaxia enana irregular. Esas zonas difieren notablemente de las regiones de formación estelar del disco de la Vía Láctea que son menores y están distribuidas con regularidad. Ello ha inducido a sospechar que las galaxias LSB gigantes pudieran ser enormes objetos cósmicos que nunca se fragmentaron, es decir, masas del tamaño de un cúmulo que jamás se partieron en galaxias menores.

Las LSB gigantes se encuentra claramente en un estadio de evolución diferente del seguido por las galaxias brillantes, mejor estudiadas. Schneider duda si llamarlas galaxias más primitivas. Las estructuras exteriores, pobres en estrellas, de las gigantes LSB reflejan, quizás, un ritmo de evolución diferente e ignorado hasta ahora.

Aunque separadas de las restantes galaxias, su relativo aislamiento no parece capaz de llenar los ingentes vacíos que cubren los mapas de distribución de las galaxias brillantes. Pero el hecho de que se alojen exclusivamente en regiones de baja densidad, en la periferia de los cúmulos, denuncia el sesgo de esas cartografías de macroescala. ¿Quién sabe si una porción considerable de la materia del universo no se hallará escondida en estas galaxias de evolución lenta?

Inmunidad y diabetes

Relaciones delicadas

Desconocemos la razón por la que el sistema inmune se revuelve contra el organismo en la diabetes de tipo I, la esclerosis en placas o la artritis reumatoide.

Denise Faustman, de la Facultad de Medicina de Harvard, y varios inmunólogos más acaban de lanzar una china en el estanque tranquilo de esa ignorancia. En su labor inquisidora han descubierto un sospechoso de lujo. Y si andan en lo cierto, habrá que replantearse muchas hipótesis sobre los mecanismos subyacentes bajo las enfermedades autoinmunes. Algunos han acogido con reserva la identificación del inculpado.

La diabetes de tipo I se presenta cuando los linfocitos *T* destruyen los islotes pancreáticos que segregan insulina. En ausencia de la hormona, los niveles de glucosa en sangre suben por las nubes, arrastrando gravísimas consecuencias, incluso fatales. Nadie sabe el motivo de que las células encargadas de luchar contra la enfermedad se tornen contra las células de los islotes, aunque sí se dispone de algunas pistas. Las personas diabéticas y los ratones diabéticos no obesos (DNO), una cepa especial de laboratorio que tiene una predisposición a desarollar la enfermedad, muestran anomalías en los genes que determinan las proteínas de clase II del CMH (complejo mayor de histocompatibilidad).

En ciertas células, las proteínas de clase II del CMH sirven para presentar antígenos, es decir, fragmentos mo-

leculares que las células encuentran en la sangre y los tejidos. Cumpliendo esa misión, las proteínas alertan a las células *T* de la presencia de infecciones en el cuerpo. Los inmunólogos aceptan, en general, que un defecto en las proteínas de clase II del CMH podría inducir, en los mamíferos, la susceptibilidad a la diabetes; por culpa de ese trastorno proteico, el sistema inmune consideraría enfermas a las células de los islotes sanos.

El estudio de Faustman, publicado en *Science*, traslada esa responsabilidad, en la provocación de la diabetes autoinmune, de las proteínas de clase II del CMH a otros miembros de la misma familia molecular, las proteínas de clase I del CMH. Lo mismo que sus gemelas de clase II, las proteínas de clase I residen en las superficies celulares y regulan el sistema inmune, pero su trabajo es el de presentar los antígenos de las propias moléculas de las células. En la glándula del timo, adiestran a las células *T* jóvenes en la discriminación entre antígenos pertenecientes al cuerpo y los que no le pertenecen.

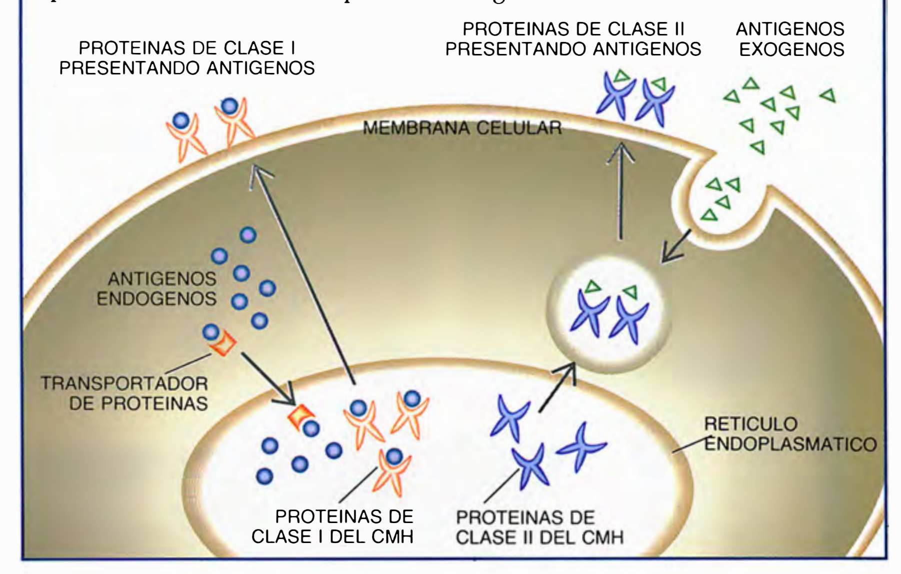
Al culpar a las proteínas de clase I del CMH, Faustman no está haciendo otra cosa que rechazar la supuesta confusión de las células *T* en su ataque contra las células de los islotes en los diabéticos. Las células *T*, sugiere, no habrían aprendido nunca a reconocer los antígenos de las células de los islotes como pertenecientes al organismo. A pesar de haber centrado su trabajo en la diabetes, el mismo mecanismo podría hallarse implicado en otras enfermedades autoinmunes.

La base que tienen Faustman y los demás firmantes para culpar a las proteínas de clase I es su insólita escasez en las personas diabéticas y en las que se hallan en alto riesgo de padecerla. Al estudiar una cepa de ratones que no tiene proteínas de clase I del complejo mayor de histocompatibilidad han encontrado que los animales muestran una tendencia moderada a desarrollar diabetes.

Los experimentos realizados con ratones DNO, deficientes también en proteínas de clase I del CMH, les llevaron a suponer que los animales presentaban una mutación en el transportador, proteína que colabora en la síntesis de moléculas de clase I del CMH uniéndolas a antígenos. Debido a la naturaleza inestable de las proteínas de clase I del CMH, a no ser que se hallen unidas a los antígenos, podría bastar la mengua de proteínas transportadoras para rebajar la producción de clase I del CMH y causar problemas inmunológicos.

Vías para las proteínas del CMH

Las proteínas del CMH, que regulan el sistema inmune, deben unirse a antígenos para expresarse en la superficie celular. Las proteínas de clase I, contrariamente a las de clase II, cuentan con moléculas transportadoras para llevarle los antígenos. Una nueva teoría sugiere que los transportadores defectuosos y la deficiencia de proteínas de clase I del CMH pueden dar origen a enfermedades autoinmunes.



Los nuevos descubrimientos suscitan muchas preguntas. Las proteínas de clase I del CMH presentan todos los autoantígenos del cuerpo, no sólo los asociados con diabetes. Si el suministro es escaso, lo normal sería que los diabéticos de tipo I sufrieran toda una batería de enfermedades autoinmunes. George Eisenbarth, del Centro de Diabetes Joslin en Boston, coautor del estudio de Faustman, aduce en su favor la observación de los clínicos en el sentido de que la susceptibilidad a una enfermedad autoinmune incrementa la susceptibilidad de los pacientes para otras. Y remacha: "ratón y hombre diabéticos de tipo I sufren una serie de alteraciones autoinmunes. La suerte de enfermedad que uno desarrolle dependerá, en parte, del azar y, en parte, del componente hereditario."

Pero no todos están convencidos de la nueva hipótesis. Edward H. Leiter, del Laboratorio Jackson en Bar Harbor, que ha dedicado muchos años al estudio de las causas genéticas de la diabetes en los ratones DNO, ha observado que la mutación en el transportador mencionada por Faustman no induce ningún defecto en la codificación de la proteína de transporte. Queda, pues, en el aire por qué la mutación habría de reducir los niveles de clase I del complejo mayor de histocompatibilidad. Objeción a la que se suman quienes, en su trabajo con ratones DNO, no han advertido esa penuria en proteínas de clase I del CMH.

Thomas Spies, del Instituto Dana-Farber para el Cáncer, con sede en Boston, experto en proteínas de transporte, razona su postura cautelosa. A pesar del descubrimiento en humanos de algunas formas variantes, no se hallado, dice, ninguna que guarde correlación significativa con la diabetes. Se trata, prosigue, de investigaciones pioneras, pues nadie ha buscado sistemáticamente defectos de proteínas de transporte en los diabéticos. Y se decanta: los indicadores genéticos más sólidos de la susceptibilidad de una persona a la diabetes parecen estar asociados con proteínas de clase II del CMH.

El artículo de *Science* indica que, en el ratón, el gen del transportador mutado está en el flanco de la región de los genes de clase II del CMH, vinculación que ha podido desorientar hasta el punto de ver una conexión entre las proteínas de clase II del CMH y la susceptibilidad a la diabetes. Eisenbarth, que no descarta la intervención subsidiaria de las proteínas de clase II del CMH, aboga por una investigación del motivo de la caída de las proteínas de clase I del CMH en diabéticos humanos, hasta averiguar si obedece a una malfunción de las proteínas de transporte o a otra causa. No parece que sea cosa exclusiva de los genes: en algunas parejas de gemelos, sólo uno es diabético y sólo éste posee bajos niveles de proteínas de clase I.

Perfiles

John Horgan

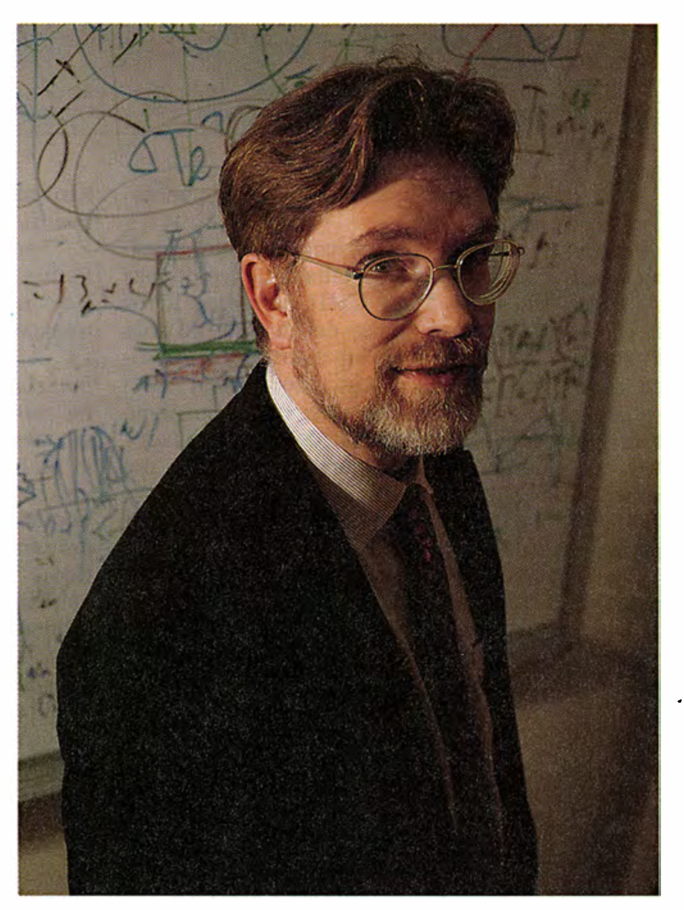
GEORGE F. SMOOT: *el cartógrafo cósmico del COBE*

Acaba de marcharse el equipo de una revista de cotilleo y nos toca a nosotros. George F. Smoot trata de responder ahora las preguntas, un poco más científicas, de Investigación y Ciencia. No sin complicaciones. Un antiguo colega le telefonea para felicitarle. Un doctorando irrumpe en el despacho y le alarga un fax: es una invitación a un foro sobre religión, ciencia y medio ambiente.

Una fotógrafa asoma la cabeza por la puerta para preguntar cuándo se quedará libre. "Me estoy hartando de que me saquen fotografías", musita él. La fotógrafa bromea sobre la incomodidad que sentirán sus colegas cuando aparezcan en la revista del corazón las que acaban de tomarle. "¡Pues si les incomoda a ellos, que no salen en las fotos!", rezonga. Tiene que asistir a una reunión en Amsterdam la semana que viene y está pensando en irse unos días antes. "El éxito te destroza", suspira.

Hace apenas unas semanas y con sus 47 años, Smoot era un astrofísico poco conocido de la Universidad de California y del Laboratorio Lawrence, situados ambos en Berkeley. Su especialidad era el fondo cósmico en microondas, la débil radiación considerada el resplandor persistente del amancecer de la creación. La comunidad astrofísica le conocía mejor, por ser el jefe del equipo de radiómetros diferenciales en microondas instalados a bordo del satélite *COBE (Cosmic Background Explorer,* Explorador del fondo cósmico*)*, cuya misión era encontrar inhomogeneidades en ella.

Los astrónomos esperaban nerviosos los resultados del *COBE*. Si no se lograba encontrar tales inhomogeneidades, sería muy difícil —quizás imposible— explicar el porqué de los numerosos grumos que tiene el cosmos. Pero durante una reunión de la American Physical Society (APS) el pasado 23 de abril, Smoot enseñó un mapa ovoide de colores chillones que, según él, mostraba las "franjas" tan largamente buscadas en la radiación primordial, correspondientes a los vastos vacíos y a los agregados de galaxias que pululan por el universo moderno. "Si son ustedes religiosos", dijo Smoot, "esto es como ver a Dios".



Smoot ha escudriñado la radiación cósmica de fondo en microondas desde principios de los 70. Fotografía: Stephanie Rausser.

Aunque de pequeño iba de vez en cuando a la iglesia, él dice no serlo especialmente; tan sólo intenta usar un lenguaje que exprese la profundidad del tema. "Cuando se empieza a hablar del segundo 10^{-43} (el instante tras la gran explosión a partir del cual los físicos pueden empezar a ocuparse del universo), nadie sabe lo que es eso. Francamente, ni siquiera los físicos."

La publicidad está empezando a cansarle. Desde la reunión de la APS, sólo logra trabajar por las noches, cuando ya está exhausto. Además, otros miembros del equipo se han quejado —y cree que con razón— de que él ha recibido demasiada atención y honores por un trabajo que era, después de todo, una labor colectiva. "Incluso cuando les dices a los periodistas que fue un trabajo de equipo, lo más que consigues es que acaben llamándote 'el jefe del equipo'." Aunque, recalca, "estuve muy metido personalmente en este trabajo durante mucho tiempo".

Hijo de un geólogo, cuyo trabajo en el Servicio Geológico de los Estados Unidos le llevó de Florida a Alaska, Smoot creció queriendo ser científico de mayor. Al final se decidió por la física, doctorándose en el Massachusetts Institute of Technologhy. Tras mudarse a la Universidad de California en Berkeley, en 1971, empezó a trabajar con el eminente físico de partículas Luis W. Alvarez.

Bajo su tutela, Smoot se decantó hacia la astronomía, largando globos para estudiar los rayos cósmicos, misteriosas partículas de alta energía que vagan por el vacío del espacio. Urgido por Alvarez a considerar otros fenómenos cuyo estudio requiriera observaciones a gran altitud, Smoot fue sintiendo una fascinación creciente por la radiación cósmica de fondo.

Por aquel entonces, el texto fundamental de cosmología era el escrito por James E. Peebles, de la Universidad de Princeton, que, según Smoot, "ha dejado huella en una ge-

neración entera de cosmólogos". En él se enseñaba que mediciones cuidadosas de la radiación en microondas deberían mostrar anisotropías correspondientes a fenómenos tales como los cúmulos de galaxias y la rotación de la Vía Láctea.

En 1977, un equipo encabezado por Smoot descubrió por primera vez que la radiación de fondo no era completamente isotrópica sino que en una dirección del espacio era más caliente que en las demás. Las observaciones se llevaron a cabo desde un U2, una aeronave originalmente pensada para misiones de espionaje. Fue Alvarez, recuerda, el que sugirió usar un U2 en vez de un globo, y quien persuadió a la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio) para que pusiera uno a su disposición.

La llamada anisotropía dipolar no sólo sorprendía por su pequeñez sino más aún porque no parecía ser el resultado de la rotación de la Vía Láctea. Los investigadores concluyeron que la rotación estaba compensada por otro movimiento, un poco mayor y en sentido opuesto, de la galaxia con respecto al fondo de microondas. El descubrimiento de este "movimiento peculiar" ayudó a que, diez años después, se avanzara la hipótesis de que hay una enorme y misteriosa masa, apodada "Gran Atractor", que atrae a la Vía Láctea y a otras galaxias cercanas hacia sí.

Mientras tanto, volviendo a 1974, Smoot, Alvarez y otros colegas de Berkeley habían elaborado una propuesta conjunta para construir un instrumento que, a bordo de un satélite, pudiera realizar una búsqueda mucho más detallada de anisotropías en la radiación de microondas. La NASA acabó por integrarla en el *COBE*, junto con otras del Centro Goddard de Vuelos Espaciales y del Jet Propulsion Laboratory. A Smoot se le asignaron los radiómetros diferenciales en microondas, uno de los tres tipos de instrumentos que hay en el satélite. "Se trataba sólo de encontrar a alguien que quisiera dedicar su tiempo a ello y cuyos proyectos quisiéramos seguir", según dice.

El nunca se vio de director. Según afirma, "era bastante tímido de pequeño y mi único deseo era hacer ciencia, incluso cuando hicimos las propuestas". Pero no falta quien asevere que, además de convertirse en director, puede llegar a serlo del tipo mordaz y hasta tiránico. Se le ha comparado con Carlo Rubbia, de quien se dice que, si consiguió el Premio Nobel en 1984, fue, en parte, por fustigar sin piedad a un equipo de físicos para que encontraran una partícula que confirmara la teoría electrodébil.

Smoot sonríe ante la comparación. "Son los gajes del oficio", dice. "Es tarea del investigador principal cuidar del instrumento. Lleva un tiempo darse cuenta de la propia responsabilidad, porque uno está acostumbrado a cooperar con otros compañeros, científicos también; dirigir un proyecto es algo muy diferente."

El proyecto *COBE* cambió varias veces de orientación en el decenio siguiente. El diseño original se hizo para ser lanzado mediante un cohete no tripulado y hubo de modificarse cuando la NASA decidió enviarlo en una de las lanzaderas de su nueva flota. Luego, a principios de los años ochenta, muchos teóricos se hicieron a la idea de que el universo había sufrido un crecimiento vertiginoso en los instantes posteriores a la gran explosión; otra teoría emparentada sostenía que la mayor parte del universo la formaban partículas lentas e invisibles. Ambas teorías, la de la inflación y la de la materia oscura fría, predecían fluctuaciones mucho menores en la radiación de fondo de microondas que las precedentes. Smoot luchó por conseguir, y consiguió, mejoras en la sensibilidad de los radiómetros. Pero aún se abatió otra crisis sobre el proyecto cuando, en 1986, explotó la lanzadera espacial Challenger, obligando a que el equipo del *COBE* rediseñara el satélite una vez más para embarcarlo en un cohete Delta.

Smoot acudió a Cabo Kennedy en noviembre de 1989 para ver cómo el satélite, impulsado por el Delta, se elevaba hacia el cielo. "Se trabaja tanto para tenerlo todo a punto y asegurarse de que todo vaya bien, que ni se te pasa por la cabeza la idea de que podría irse al garete; cuando te das cuenta, ya es demasiado tarde." No había plan de repuesto; si el satélite se hubiera destruido, quince años de trabajo habrían desaparecido. "Fue un experimento de gran riesgo", dice sonriendo.

Empezaron a acumularse los resultados y él a insistirles a quienes tenían que procesar los datos que "cualquier cosa que encontremos será muy importante. Si son fluctuaciones, porque sabremos que hay materia oscura por ahí fuera; y, si no lo son, porque significa que no es la gravedad la causante de la estructura, que hay en juego otra nueva fuerza. En uno y otro caso, será un gran descubrimiento, así que vamos a por ello".

Cuando, durante el verano del pasado año, empezaron a verse retazos de estructuras surgiendo de un mar de ruido, hostigó a sus colegas para que no cejasen en la búsqueda de posibles fuentes de error. Ofreció un viaje gratis, en avión y a cualquier lugar del mundo, a quien encontrase un fallo en los datos. "Nunca puedes estar seguro cuando todo depende de partes por millón."

Pero llegó un momento, a finales de año, en que quedó convencido. ¿Cómo podía estar seguro? En respuesta a la pregunta, Smoot saca un grueso cuaderno de una atestada estantería. En él están recopilados "todos los errores sistemáticos que pude imaginar a lo largo de los años. No es algo improvisado; era parte intrínseca del diseño del experimento desde el principio."

Se inició la laboriosa tarea de escribir los resultados —los cuatro artículos pasaron por más de cien revisiones antes de ser enviados a las revistas—, período durante el cual hubieron de mantener a raya a los colegas curiosos. "Yo intentaba que la gente no se aclarara, para tener un poco más de tiempo para revisar los resultados y todo eso", dice. "La gente me preguntaba: 'He oído que las habéis encontrado (anisotropías) a tal y tal nivel', y yo les contestaba, 'Eso es demasiado, ¿no te parece?'."

Cuando se hizo el anuncio oficial, representó la muerte súbita de unas cuantas teorías cosmológicas, pero a Smoot no le pesa. "Es comprensible", dice, "que a la gente le resulte duro enterrar sus teorías, pero, por otro lado, es conveniente concentrarse en un área más pequeña. Si hay demasiada libertad en el universo primitivo, los teóricos pueden inventar cualquier cosa".

Está ansioso por volver a la tarea de analizar los datos que siguen enviando los radiómetros diferenciales. "Tenemos dos años de datos, estamos en el tercero de recogida y he pedido formalmente un cuarto año. Probablemente querremos seguir con ello hasta que el satélite estire la pata, sobre todo ahora, porque, si los rusos no son capaces de lanzar su satélite, pasará mucho tiempo antes de que nadie pueda construir un mapa mejor."

Tiene que arreglárselas también para escribir un libro sobre su descubrimiento para una editorial, cuyo título provisional es *Arrugas del Tiempo*, si bien contará con la ayuda de un divulgador. No quiere revelar la cuantía de su contrato. "Ya tengo bastantes problemas con atender a todos esos periodistas", dice. "No quiero que la gente piense además que me estoy haciendo rico."

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

El vuelo de la lechuza

Estos sigilosos pájaros de presa, que constituyen el orden *Estrigiformes* de las aves, son notables por más de un concepto. Están presentes en el universo mundo, desde las sabanas a los densos bosques tropicales, sin rechazar la cercanía del hombre, lo que pone de manifiesto su gran capacidad adaptativa. Los hay incluso preparados para vivir en zonas marítimas y alimentarse de peces, a diferencia de los roedores, insectos y anfibios, que forman la dieta básica de la mayoría de sus congéneres. A su favorable evolución ayudan tanto una fecundidad poco usual (con puestas de hasta doce huevos), como un eficaz camuflaje y sus hábitos nocturnos y discretos en extremo.

Cuando por casualidad puede observarse a uno de ellos aposentado sobre la rama de un árbol, sorprende la fijeza hipnotizante de sus grandes ojos saltones, que asociamos con una actitud de severa reserva. La verdad es que sus ojos carecen prácticamente de capacidad de movimiento, lo que está más que compensado por la flexibilidad del cuello, que les permite girar la cabeza hasta casi tres cuartos de círculo. Era de esperar que su visión fuese muy aguda en condiciones de iluminación precarias, como así sucede, pero a ello añaden un finísimo oído, gracias al que pueden localizar y capturar a sus presas en total oscuridad.

Todas estas características pueden explicar su abundancia y la certera intuición de los griegos al asociar la lechuza con su diosa más preciada, Atenea, paradigma de eficacia y sabiduría. Pero son también las que hacen a estas aves poco conspicuas y difíciles de observar, por lo que hay mucho todavía que se ignora de ellas. Más arduo aún es fotografiarlas, lo que conseguí montando discretamente la cámara cerca del nido y dejando que un sensor de temperatura se encargase de realizar automáticamente las exposiciones.



lente: 50 mm macro
diafragma: F = 22
exposición: 1/6000 de segundo
carrete: ISO = 100



Algoritmos genéticos

Programas que "evolucionan", simulando en cierto grado la selección natural, alcanzan a resolver problemas complejos, que ni siquiera quienes los crearon comprenden plenamente

John H. Holland

Los organismos vivos poseen destreza consumada en la resolución de problemas. Manifiestan una versatilidad capaz de avergonzar a los programas más refinados. Esta observación resulta un tanto molesta para los informáticos, que han de dedicar meses o años de esfuerzo intelectual a preparar un algoritmo, mientras los organismos obtienen sus habilidades a través de mecanismos como la evolución y la selección natural, que no parecen proponérselo.

Los investigadores más pragmáticos consideran que lo que hay que hacer no es envidiar la eficacia de la evolución, sino emularla. La selección natural elimina uno de los mayores obstáculos que entorpecen el diseño de programas, a saber, la especificación por adelantado de todas las características y peculiaridades de un problema y de las acciones requeridas para atenderlas. Si se consiguiera incorporar a los programas mecanismos evolutivos, podrían "criarse" programas aptos para la resolución de problemas que nadie comprendiese por completo —programas heurísticos—. Y a decir verdad, algoritmos de este tipo, denominados genéticos, han demostrado ya su capacidad para abrir nuevas brechas en el diseño de sistemas tan complejos como los motores de reacción.

JOHN H. HOLLAND ha estado investigando la teoría y la práctica de la evolución algorítmica durante cuarenta años. Es profesor de psicología y de ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en la Universidad de Michigan. Realizó sus estudios de primer ciclo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en 1950, y ejerció también en el Grupo de Planificación Lógica del primer ordenador electrónico programable de IBM (el 701) desde 1950 hasta 1952. Los títulos de licenciatura y doctorado son de la Universidad de Michigan. Ha sido miembro del Steering Committee del Instituto de Santa Fe desde su creación en 1987, donde es profesor externo.

Los algoritmos genéticos permiten la exploración de un abanico mucho más amplio de posibles soluciones que los programas tradicionales. Como ventaja adicional, al analizar los mecanismos de selección natural entre programas, en condiciones perfectamente comprendidas y controladas, los resultados prácticos conseguidos podrían arrojar alguna luz sobre la evolución de la vida y la inteligencia en el mundo natural.

En casi todos los organismos, la evolución se produce a resultas de dos procesos primarios: la selección natural y la reproducción sexual. La primera determina qué miembros de la población sobrevivirán hasta reproducirse; la segunda garantiza la mezcla y recombinación de sus genes entre la descendencia. En la fusión del óvulo y el espermatozoide, los cromosomas homólogos se estiran y adosan uno al otro, y luego se entrecruzan en zonas intermedias, trocando así material génico. Merced a esta mezcla y cruzamiento, los seres vivos evolucionan a velocidad mucho mayor que si cada descendiente contuviera una mera copia de los genes de un único progenitor, modificados a veces por simple mutación. (Aunque los seres unicelulares no se aparean, en el sentido que los humanos gustan dar al término, sí intercambian material génico y su evolución es descriptible en términos parejos.)

La selección constituye un proceso sencillo: cuando un organismo falla en alguna prueba de idoneidad, como el reconocimiento y consiguiente huida de un depredador, perece. Por su parte, los informáticos no tienen dificultad en eliminar los algoritmos de funcionamiento deficiente o de rendimiento bajo. Si, por ejemplo, un programa tiene la función de ordenar en sucesión creciente una serie de números, su funcionamiento se verifica comprobando que cada número de la lista de salida sea mayor que el precedente.

Los humanos han estado practicando durante milenios una combinación de cruzamiento y selección de linajes en busca de cosechas mejores, corceles más veloces o rosas más ornamentales. No resulta, sin embargo, igual de simple la aplicación de estos métodos a los programas informáticos. El problema principal es la construcción de un "código genético" capaz de representar la estructura de los distintos programas, en forma parecida a como el ADN representa la estructura de un ratón o de un ser humano. Al aparear y mutar el texto de dos programas en FORTRAN, sea por caso, casi nunca se obtiene un programa en FORTRAN cuya calidad sea superior a los originales; es más, ni siquiera inferior. Lo que suele obtenerse es un programa que no funciona.

Las primeras tentativas realizadas para imbricar evolución e informática, a finales del decenio de 1950 y comienzos del siguiente, no llegaron muy allá, porque se fundaron en las nociones biológicas de la época y fiaron más en la mutación que en el apareamiento para engendrar nuevas combinaciones génicas. Por estas últimas fechas, Hans J. Bremerman, de la Universidad de California en Berkeley, añadió una especie de apareamiento: las características de la descendencia estaban determinadas por un resumen de los correspondientes genes de los padres. El proceso resultaba, empero, muy restringido, al ser sólo aplicable a las características que pudieran sumarse de forma coherente y significativa.

Por aquel entonces, yo había estado investigando el análisis matemático de la adaptación biológica y había llegado a la convicción de que

la recombinación de grupos de genes por apareamiento constituía una faceta crítica de la evolución. A mediados del decenio de 1960, había puesto a punto una técnica de programación, el algoritmo genético, que se adapta bien a la evolución, sea por mutación o por apareamiento. En los diez años siguientes me esforcé por extender el alcance de los algoritmos genéticos y crear un código genético capaz de representar la estructura de cualquier programa.

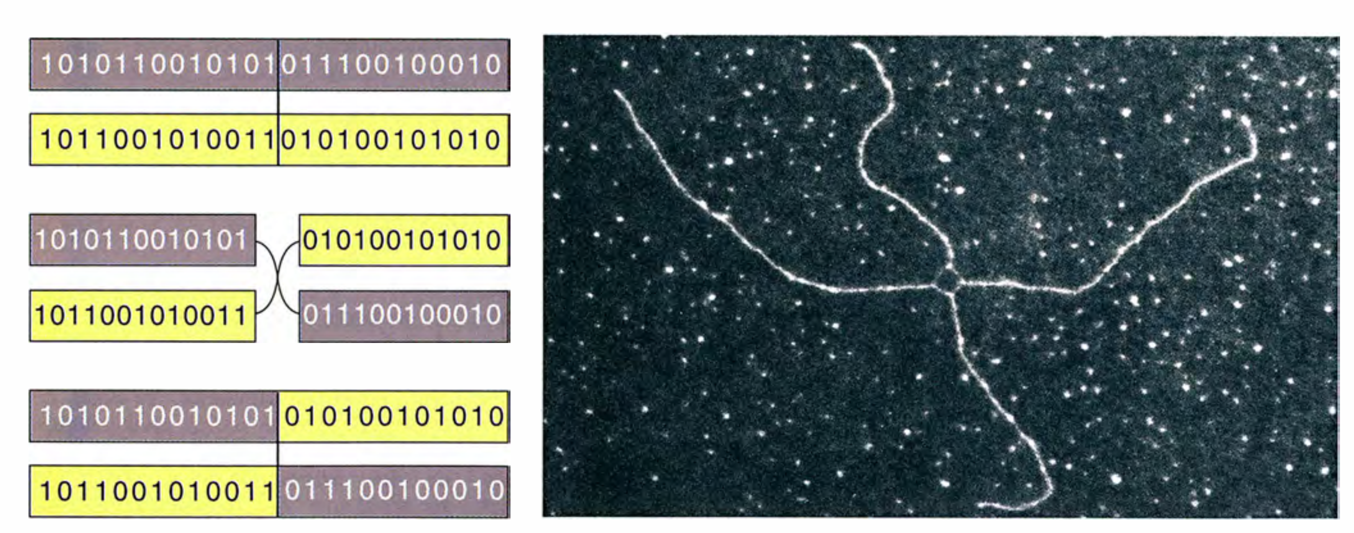
El resultado fue lo que denomino sistema clasificador. Consiste en un conjunto de reglas, cada una de las cuales realiza determinadas acciones siempre que algún dato satisfaga sus condiciones. Condiciones y acciones están representadas por ristras o cadenas de bits correspondientes a la presencia o ausencia de características específicas en las entradas o salidas de las reglas. Por cada característica que se halle presente, la ristra contendrá un 1 en la posición adecuada y, por cada una ausente, un 0. Por ejemplo, podríamos codificar una regla clasificadora para reconocer perros mediante una cadena que contuviera unos para los bits correspondientes a "peludo", "se lame", "ladra", "leal" y "busca palos" y, en cambio, señalara con ceros los correspondientes a "metálico", "habla urdu" y "posee tarjetas de crédito". Con mayor realismo, el programador debería elegir las características más simples y primitivas, las más elementales, de forma que pudieran combinarse —como en el juego de las veinte preguntas— para clasificar una amplia variedad de objetos y situaciones.

Aunque el rasgo más destacado de estas reglas sea su capacidad de reconocimiento, pueden servir también para iniciar acciones, si ciertos bits de su salida se ligan a conductas apropiadas (*véase la ilustración 3*). Cualquier programa que pueda escribirse en alguno de los lenguajes de programación clásicos, como FORTRAN o LISP, puede redactarse en forma de sistema clasificador.

La forma de obtener por evolución un conjunto de reglas clasificadoras capaces de resolver un problema dado es la siguiente. Se parte de una población de ristras aleatorias de unos y ceros y se evalúa cada una de ellas atendiendo a la calidad de su resultado. Según el problema de que se trate, la medida de adecuación puede ser el beneficio comercial, el tanteo en un juego, la tasa de error o cualquiera de otros múltiples criterios. Las cadenas de mayor



1. LA ORQUIDEA ABEJORRO pone de manifiesto la especificidad con que la selección genética natural puede adaptar un organismo a un nicho particular. La flor, que recuerda un abejorro hembra, es fertilizada por machos que tratan de aparearse con ella. Según el autor, mecanismos parecidos a los de la selección natural pueden producir programas (los algoritmos genéticos) capaces de resolver problemas tan complejos como el diseño de turbinas de gas o de redes de comunicaciones.



2. EL CRUZAMIENTO constituye el mecanismo fundamental de la reorganización genética. Los cromosomas se adosan, para intercambiar luego las porciones de sus códigos genéticos situados a partir del punto de cruce.

calidad se aparean; las inferiores perecen. Con el transcurso de las generaciones irán predominando las cadenas asociadas a soluciones cada vez más perfectas. Además, el proceso de apareamiento combina sin cesar estas ristras de nuevas formas, generando soluciones más y más refinadas. Los tipos de problemas que han resultado adecuados para esta técnica van desde el desarrollo de nuevas estrategias en la teoría de juegos hasta el diseño de sistemas mecánicos complejos.

Vertida al lenguaje de los algoritmos genéticos, la búsqueda de soluciones idóneas de un problema consiste en la de determinadas ristras binarias. El universo de todas las posibles cadenas puede ser concebido como un paisaje imaginario, en el que la ubicación de las ristras que codifican el problema está señalada por cimas y valles; estos últimos albergan a las correspondientes a las soluciones menos buenas, mientras que el punto más elevado lo ocupa la cadena óptima.

También podemos definir regiones del espacio de soluciones fijándonos en las ristras que posean unos o ceros en lugares determinados, una especie de equivalencia binaria de las coordenadas de un mapa. El conjunto de todas las ristras que empiecen por 1, sea por caso, constituye una región en el espacio de posibilidades. Otro tanto sucede con todas las que empiecen por 0, o las que tengan un 1 en la cuarta posición, un 0 en la quinta y un 1 en la sexta. Y así sucesivamente.

Una técnica habitual para la exploración de tal paisaje es la escalada: se comienza en un punto elegido al azar; si una ligera modificación mejora la calidad de nuestra solución, se prosigue en esa dirección; de no ser así, se toma la dirección contraria. Sin embargo, los problemas complejos originan paisajes con muchos puntos cimeros. Al aumentar el número de dimensiones del problema, el territorio puede contener muchos túneles, puentes e incluso complicadas peculiaridades topológicas. El hallazgo del montículo adecuado, e incluso la mera determinación del sentido de ascenso, se tornan cada vez más problemáticos. Además, tales espacios de búsqueda suelen ser enormes. Si, por ejemplo, cada jugada de una partida de ajedrez tuviera en promedio diez continuaciones, para una partida típica de treinta jugadas por bando se dispondría de unas 10^{60} estrategias distintas (casi todas ellas, de nulo interés).

Los algoritmos genéticos echan la red sobre este paisaje. La multitud de ristras de una población que evoluciona la sondean en muchas regiones a la vez. Es notable que la tasa a que el algoritmo genético toma muestras en diferentes regiones se corresponda directamente con su "elevación" media, es decir, con la probabilidad de hallar una buena solución en ese entorno.

Esta destacada facultad de los algoritmos genéticos para concentrar su atención en las porciones más prometedoras de un espacio de soluciones es fruto directo de su capacidad para intercambiar cadenas portadoras de soluciones parciales. Para empezar, cada ristra de la población se evalúa con vistas a determinar el rendimiento de la estrategia codificada en ella. Después, las que logran mayor puntuación se aparean entre sí: se alinean, se selecciona un punto al azar y se procede al intercambio de las subcadenas situadas a la izquierda del mismo. Se engendran así dos descendientes: uno que contiene los símbolos de la primera ristra hasta el punto de cruce más los de la segunda a partir de ese punto y, el otro, formado por la hibridación complementaria (*véase la ilustración 2*). Los cromosomas biológicos se intercambian al encontrarse dos gametos para constituir un zigoto, por lo que el proceso de hibridación de algoritmos genéticos remeda de cerca el modelo biológico en que se inspira. La progenie no reemplaza a las ristras progenitoras; sí substituye, en cambio, a las de adecuación baja, que van siendo eliminadas en cada generación, de manera que la población permanece constante.

Por último, hay mutaciones que modifican a una minúscula fracción del total de cadenas: aproximadamente uno de cada 10.000 símbolos se troca de 0 en 1 o viceversa. La mutación, por sí sola, no suele generar progresos en la búsqueda de una solución, pero sí proporciona garantías contra el desarrollo de una población uniforme e incapaz de ulterior evolución.

El algoritmo genético explota las regiones de más alto rendimiento del espacio de soluciones (las regiones "diana") porque las sucesivas generaciones de reproducción y cruzamiento generan un número creciente de ristras pertenecientes a ellas. El algoritmo favorece que las ristras más aptas asuman roles progenitores y, por esta razón, las cadenas superiores al promedio (que yacen en regiones diana) tendrán mayor descendencia en la generación siguiente.

De hecho, el número de ristras de una región dada aumenta a ritmo proporcional a la estimación estadística

de la idoneidad de esa región. Un estadístico tendría que evaluar docenas de muestras tomadas de millares o millones de regiones para determinar la adecuación o idoneidad media de cada región. El algoritmo genético logra alcanzar el mismo resultado con muchísimas menos cadenas y prácticamente sin cómputo alguno.

La clave de esta conducta, francamente sorprendente, reside en que cada ristra individual pertenece a todas las regiones en las cuales aparece uno cualquiera de sus bits. La cadena 11011001, sea por caso, es miembro de todas las regiones 11****** (donde el asterisco * indica que es indiferente el valor del bit correspondiente), 1******1, **0**00* y demás. Las regiones más amplias —las que contienen muchos bits sin especificar— serán muestreadas normalmente por una gran fracción de todas las ristras de una población. Así pues, un algoritmo genético que manipule una población de unos cuantos millares de cadenas está realmente tomando muestras de un número de regiones enormemente mayor. Tal paralelismo implícito (en el sentido de procesamiento en paralelo) proporciona al algoritmo genético su ventaja principal sobre otros procesos de resolución de problemas.

El cruzamiento complica los efectos del paralelismo implícito. El propósito de la hibridación de ristras en el algoritmo genético es poner a prueba nuevas porciones de las regiones diana, y no examinar una y otra vez la misma ristra en sucesivas generaciones. Pero el proceso puede también "expulsar" a un descendiente de una región y situarlo en otra, con el resultado de que la tasa de muestreo de las distintas regiones se desvíe de la estricta proporcionalidad a la adecuación media, lo que reduciría la tasa de evolución.

La probabilidad de que la descendencia de dos ristras abandone la región de sus progenitoras depende de la distancia entre los unos y los ceros que definan la región. La descendencia de una cadena perteneciente a la región 10****, por ejemplo, solamente podrá caer fuera de ella si el punto de hibridación comienza en la segunda posición de la ristra, lo que supone un caso favorable frente a cinco contrarios en el caso de una cadena que contenga seis genes. (El mismo bloque constitutivo correría un riesgo de sólo una parte frente a 999 si estuviera contenido en una ristra de 1000 genes.) Por el contrario, la descendencia de una ristra de seis genes perteneciente a la región 1****1 corre el riesgo de abandonarla inmediatamente, con independencia del lugar donde se produzca el cruzamiento.

Cuando los unos y ceros que definen una región son contiguos, se les llama bloques constructivos compactos. Son los que mayores probabilidades tienen de salir intactos de un cruzamiento y propagarse a las generaciones futuras, lo que harán con tasa proporcional a la idoneidad media de las ristras que los contienen. Aunque un mecanismo de reproducción que se sirva del cruzamiento no consigue tomar muestras de todas las regiones con tasa proporcional a su adecuación, sí lo logra para todas las definidas por bloques constructivos compactos. El número de tales bloques en una población de ristras todavía excede con mucho del número de éstas y, en consecuencia, el algoritmo genético sigue exhibiendo paralelismo implícito.

Es interesante observar que la inversión, una operación genética natural, efectúa en ocasiones una redisposición de genes, de manera que algunos muy alejados en el genoma de los padres queden muy próximos en el de la progenie. A esto equivale la redefinición de un bloque constructivo para que resulte más compacto y menos expuesto a la rotura en el cruzamiento. Si el bloque constructivo especifica una región de elevada adecuación media, la versión más compacta desplaza automáticamente a la menos compacta, al perder menor número de descendientes por errores de transcripción. En consecuencia, un sistema adaptativo que utilice inversión puede descubrir y favorecer versiones compactas de los bloques constructivos útiles.

El paralelismo implícito del algoritmo genético le permite ensayar un gran número de regiones del espacio de búsqueda manipulando un número

Construcción de un sistema clasificador

La construcción de un algoritmo capaz de evolucionar requiere un método especial de representación del programa, de modo que cualquier cambio de su genotipo (la ristra de dígitos binarios que lo componen) conduzca a un cambio válido de su fenotipo (lo que el programa realiza). Un sistema de clasificación consiste sencillamente en ristras representativas de posibles características de los datos proporcionados al programa y de las acciones a realizar (*abajo*).

ALFABETO DEL CLASIFICADOR	1 = SI	0 = NO	# = INDIFERENTE

Un sistema clasificador que tratase de emular a una rana podría contener ristras que reaccionasen ante los objetos vistos por ella. Según el movimiento, tamaño, ubicación y otros atributos del objeto, la rana lo atacaría, lo perseguiría o lo ignoraría. Si hubiese varias ristras concordantes con una misma entrada, predomina la que tenga menos símbolos de indiferencia.



SE MUEVE	EN EL SUELO	GRANDE	LEJANO	MOTEADO	¡HUIR!	¡PERSEGUIR!
ENTRADA					SALIDA	
1	#	#	#	#	1	0

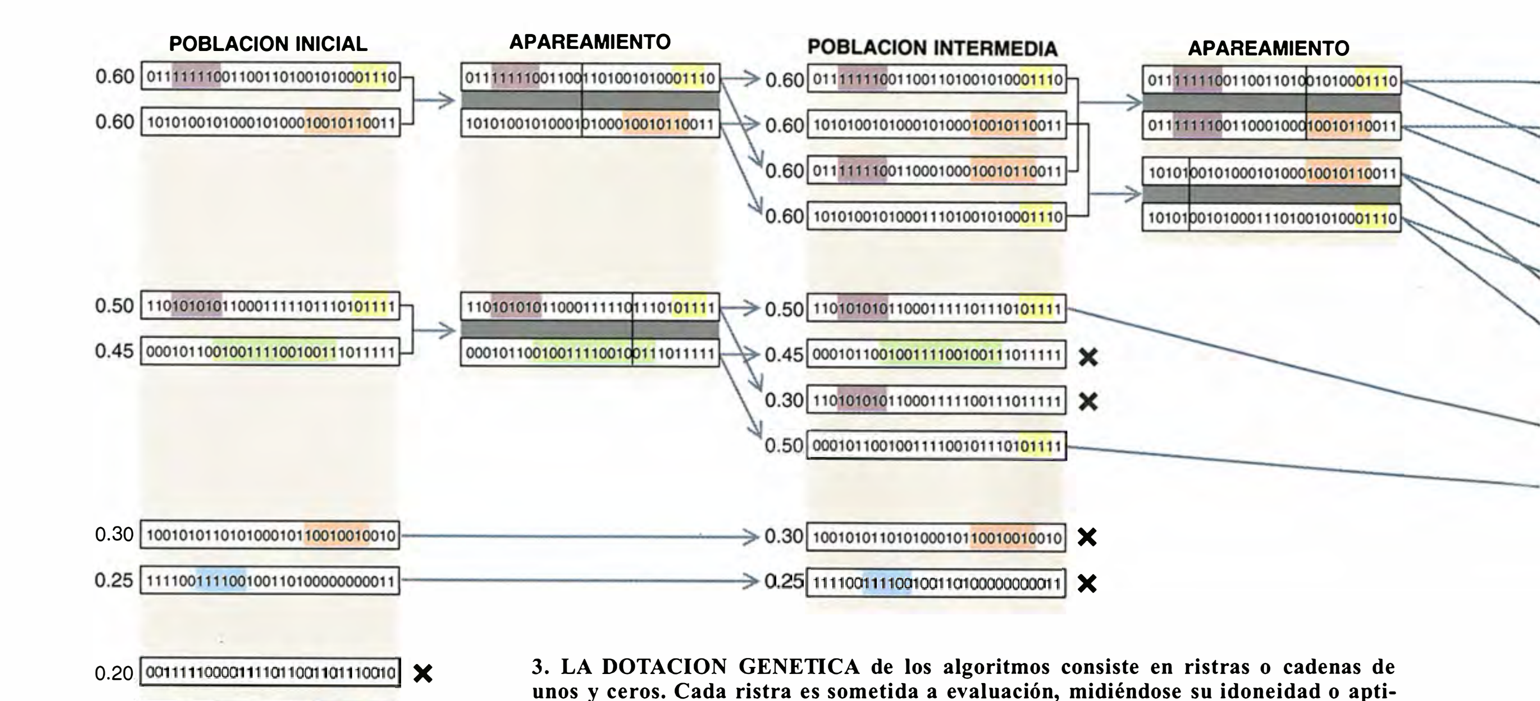
SI EL OBJETO SE MUEVE, HUIR

1	0	0	0	#	0	1

SI SE MUEVE, ESTA EN EL AIRE, ES PEQUEÑO Y CERCANO, PERSEGUIRLO

1	0	0	0	1	0	0

SI SE MUEVE, ESTA EN EL AIRE, ES PEQUEÑO, CERCANO Y MOTEADO, NO HACER NADA



3. LA DOTACION GENETICA de los algoritmos consiste en ristras o cadenas de unos y ceros. Cada ristra es sometida a evaluación, midiéndose su idoneidad o aptitud; después, las más idóneas se aparean (*segunda columna*) y engendran progenie por cruzamiento (*indicado por una línea negra vertical*). Las cadenas de idoneidad media se limitan a sobrevivir hasta la generación siguiente; las menos aptas perecen. En el caso de que ciertas sartas parciales (*zonas resaltadas en color*) mejoren la idoneidad de quienes las portan, la reiteración de ciclos de evaluación y apareamiento (*columnas sucesivas*) hará que la proporción de estos "bloques constructivos" de calidad aumente. En la columna de la derecha aparece la pauta correspondiente a cada bloque constructivo; los asteriscos representan bits cuyos valores no se especifican.

relativamente reducido de ristras. También le facilita afrontar problemas no lineales, problemas en los que la adecuación de una cadena que contenga dos bloques constructivos concretos puede ser mucho mayor (o mucho menor) que la suma de adecuaciones atribuibles por separado a cada bloque constructivo individual.

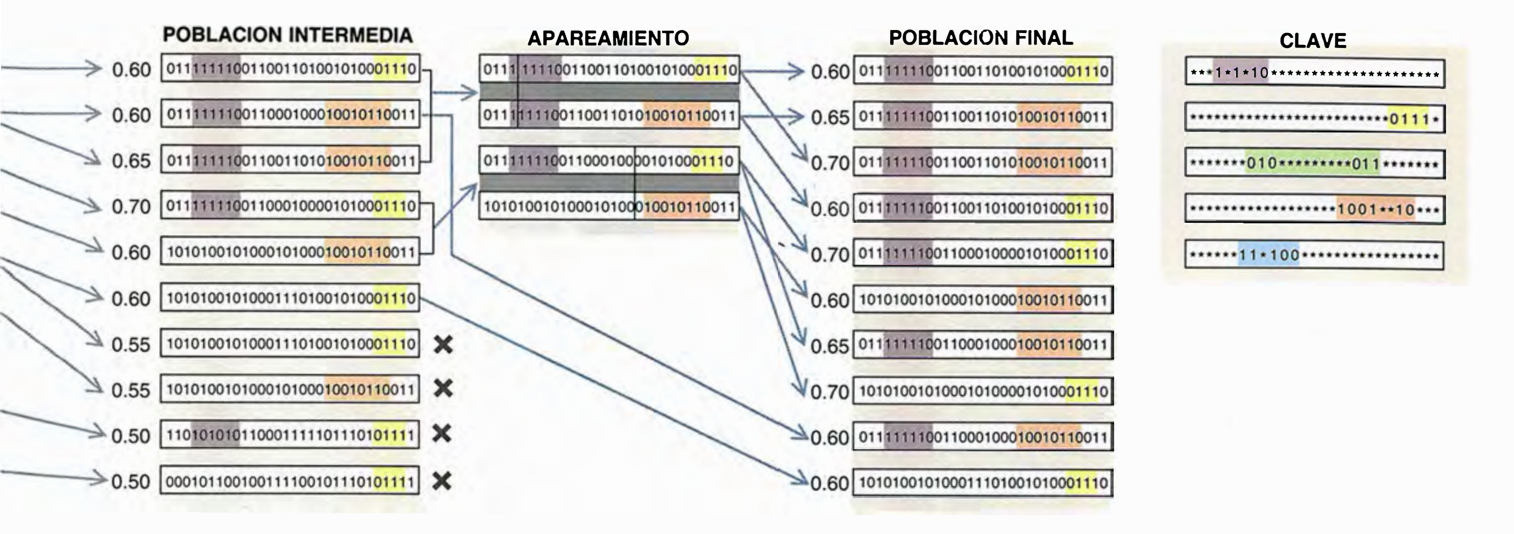
Los problemas lineales presentan un espacio de búsqueda reducido, porque la presencia de un 1 o un 0 en una posición dada de la ristra carece de efectos sobre la adecuación atribuible a su presencia en cualquier otro lugar. Un espacio de cadenas de 1000 dígitos, por ejemplo, contiene más de 3^{1000} posibilidades; pero, si el problema es lineal, el algoritmo solamente precisa investigar ristras que contengan un 1 o un 0 en cada posición, lo que las reduce a 2000.

Cuando el problema es no lineal, la dificultad crece abruptamente. La idoneidad de la región *01*** , por ejemplo, podría estar por encima del promedio de la población, a pesar de que las idoneidades asociadas a *0**** y a **1*** se hallasen por debajo del mismo. La ausencia de linealidad no entraña la inexistencia de bloques constructivos útiles; supone, tan sólo, que los bloques formados por unos o ceros individuales no resultarán adecuados. Característica que, a su vez, conduce a una explosión de posibilidades; así, el conjunto de todas las ristras de 20 bits de longitud contiene más de tres mil millones de bloques constructivos. Por fortuna, todavía puede sacarse partido del paralelismo implícito. En una población de unos cuantos millares de cadenas serán muchos los bloques constructivos compactos que aparezcan en 100 o más ristras, suficientes para proporcionar una buena muestra estadística. Los bloques constructivos que saquen partido de no-linealidades para conseguir rendimientos superiores al promedio se utilizarán automáticamente con mayor frecuencia en las futuras generaciones.

Además de habérselas con la no-linealidad, el algoritmo genético contribuye a resolver un dilema que, desde siempre, ha complicado la vida a los métodos tradicionales de resolución de problemas, a saber, la consecución de un equilibrio entre exploración y explotación. Si, pongamos por caso, se encuentra una buena estrategia para jugar al ajedrez, resulta posible limitarse luego a explotarla. Tal decisión lleva consigo un coste oculto, porque torna inverosímil el descubrimiento de ulteriores estrategias novedosas, quizá mejores. Se progresa como resultado de probar cosas nuevas y arriesgadas. Muchos de los riesgos se convierten en realidad, por lo que la exploración comporta una degradación del rendimiento. Un problema clásico con el que se encuentran todos los sistemas capaces de aprendizaje y adaptación estriba en decidir la medida en que ha de hipotecarse el presente para conseguir un futuro mejor.

El algoritmo genético lo aborda basándose en el cruzamiento. Aunque el cruzamiento puede degradar la explotación de un bloque constructivo, fragmentándolo, la recombinación lo pone a prueba en combinaciones y contextos nuevos. El cruzamiento genera nuevas muestras de regiones que superan al promedio, confirmando o infirmando las estimaciones producidas por muestras anteriores. Además, cuando el cruce fragmenta un bloque constructivo, produce un bloque nuevo y capacita al algoritmo genético para ensayar regiones no exploradas previamente.

El juego conocido por "dilema del preso" permite ilustrar la capacidad del algoritmo genético para equilibrar exploración y explotación. Este juego, tan estudiado, obliga a quienes lo practican a optar entre "colaboración" y defraudación o "defección". Si ambos jugadores colaboran, ambos reciben un mismo "pago"; si



uno de ellos "defrauda" al otro, el "judas" recibe un pago mayor y el "ingenuo" traicionado no recibe nada; si ambos se traicionan, cada uno recibe un pago mínimo (*véase la ilustración 5*). Por ejemplo, si el jugador A coopera y el jugador B traiciona, A no recibe pago alguno y B recibe un premio de cinco puntos.

El dilema del preso se estudia en sociología y en ciencias políticas, porque proporciona un ejemplo nítido y claramente definido de las dificultades que suscita la cooperación. La teoría de juegos indica que cada jugador debería tratar de minimizar los daños que el otro pueda infligirle; con otras palabras, cada jugador debería traicionar al otro. Empero, cuando dos personas juegan repetidamente, lo típico es que aprendan a colaborar, para elevar así las ganancias mutuas. Una de las estrategias más eficaces que se conocen para el dilema del preso es la del "toma y daca" o del "ojo por ojo": se empieza cooperando y, en jugadas sucesivas, se actúa como lo hiciera en la última suya el otro participante. Es decir, se paga con la misma moneda; la traición se castiga con traición y la cooperación se remunera con cooperación.

Robert Axelrod, de la Universidad de Michigan, y Stephanie Forrest, ahora en la de Nuevo México, se propusieron averiguar si el algoritmo genético conseguiría descubrir la estrategia del "toma y daca". El primer paso es la traducción de las posibles estrategias a ristras de bits. Una forma sencilla de conseguirlo basa la próxima respuesta en los resultados de las tres últimas jugadas. Cada iteración ofrece cuatro resultados posibles, por lo que una secuencia de tres jugadas arroja 64 posibilidades, cada una de las cuales queda representada por una posición (gen) de una cadena de 64 bits. El primer gen, pongamos por caso, reflejaría tres cooperaciones mutuas consecutivas, correspondiendo el último a tres traiciones recíprocas, igualmente seguidas. El valor de cada gen sería de 1 o 0, dependiendo de que la respuesta preferida a su correspondiente historia fuese cooperación o traición. Por ejemplo, la ristra de 64 bits compuesta exclusivamente por ceros designaría la estrategia de traición en todos los casos. Incluso para un juego tan sencillo como éste, existen 2^{64} estrategias diferentes (unos 16 trillones).

Axelrod y Forrest proporcionaron al algoritmo genético una pequeña colección de ristras aleatorias, representativas de estrategias. La adecuación de cada ristra se definió, sencillamente, como la media de los pagos que ocasionaba su estrategia al repetir el juego muchas veces. Todas las estrategias iniciales tenían promedios de adecuación bajos, porque la mayoría de las posibles para afrontar el dilema del preso son malas. El algoritmo genético descubrió rápidamente el "toma y daca" y procedió a explotarlo; pero la evolución ulterior introdujo un refinamiento adicional. La nueva estrategia, descubierta cuando el algoritmo genético se encontraba ya en un nivel de juego alto, se aprovecha de los jugadores que le toleren "jugar de farol", es decir, los capaces de seguir cooperando a pesar de haber sido traicionados, si bien retornaba a la del "toma y daca" en cuanto el historial del juego demostraba que el otro dejaba de hacer el primo.

Resulta evidente que la evolución biológica no opera en el sentido de producir un único superindividuo sino en el de generar especies bien adaptadas unas a otras, en interacción mutua. (La verdad es que, en el reino biológico, no existe lo que pudiéramos llamar individuo óptimo.) Del mismo modo, resulta posible utilizar el algoritmo genético, modificado, no para gobernar la evolución de meras reglas o estrategias individuales, sino de "organismos" compuestos por multitud de reglas. En lugar de seleccionar aisladamente las reglas más idóneas, las presiones competitivas pueden llevar a la evolución de sistemas mayores, cuyas facultades se encuentren codificadas en las ristras de bits que los componen.

El remedo de la evolución a este nivel superior exige algunas modificaciones del algoritmo genético original. Las ristras siguen representando reglas sobre condiciones y acciones; como antes, cada regla cuyas condiciones se satisfacen genera una acción. Empero, si las reglas se evaluasen por el número de acciones correctas que generan, se primaría la evolución de "super-reglas", en lugar

El dilema del preso

JUGADOR	(B) COOPERA	(B) DESERTA
(A) COOPERA	3/3	5/0
(A) DESERTA	0/5	0/0

4. EN EL DILEMA DEL PRESO, cada uno de los jugadores puede cooperar o defraudar; la puntuación recibida en cada caso depende de lo que decida el otro. Por ejemplo, si ambos cooperan, cada uno recibe tres puntos. La estrategia más segura es la mutua defraudación; empero, si el juego se desarrolla a muchos envites, es corriente que desemboque en conductas cooperativas.



5. ESTE PROGRAMA para el diseño de turbinas de gas está provisto de un algoritmo genético, que combina las mejores características de diseños producidos por otros programas. Los ingenieros que lo utilizaron consiguieron mejores resultados que quienes sólo se sirvieron de ayudas informáticas más tradicionales.

del hallazgo de grupos de reglas que interactúen de modo provechoso. Para reconducir la búsqueda hacia ellos, se modifica el procedimiento, forzando a las reglas a disputarse el control de las acciones del sistema. Aquella cuyas condiciones queden satisfechas en una situación determinada compite con todas las demás cuyas condiciones también se cumplan; las más vigorosas determinarán el comportamiento del sistema en esa situación. Si las acciones del sistema producen resultados satisfactorios, todas las reglas ganadoras se verán reforzadas; en el caso contrario, sufrirán un debilitamiento.

Puede enfocarse este método desde otra perspectiva. Podríamos considerar a cada una de las ristras-reglas como una hipótesis acerca del mundo del clasificador. La entrada en competición de una regla sólo se produce cuando "declara" ser pertinente para la situación actual. Su capacidad competitiva depende de lo importante que haya sido su contribución previa a la resolución de problemas parecidos. Conforme avanza el algoritmo genético, las reglas vigorosas se aparean y engendran reglas descendientes, en las que se combinan los bloques constructivos de sus progenitoras. Esta progenie, que desplaza a las reglas más débiles, vendría a constituir un conjunto de hipótesis plausibles todavía no sometidas a prueba.

La competencia entre reglas proporciona al sistema un método elegante para afrontar las continuas novedades. Decir que un sistema dispone de reglas potentes para responder a determinada situación equivale a afirmar que posee ciertas hipótesis bien validadas. Las reglas descendientes, que comienzan su vida siendo más débiles que sus progenitoras, únicamente pueden ganar la competición e influir en el comportamiento del sistema cuando no existan reglas fuertes cuyas condiciones se satisfagan o, dicho de otro modo, cuando el sistema no sepa qué hacer. Si sus acciones son beneficiosas, sobreviven; de no ser así, pronto serán reemplazadas. Por tanto, la descendencia no interfiere con la acción del sistema en las situaciones bien ensayadas, limitándose a estar a la espera, con el carácter de hipótesis relativas a lo que convendría hacer si se dieran nuevas circunstancias.

Cuando la competencia se desarrolla de esta forma, la evolución de un sistema clasificador cambia mucho. Poco después de empezar a funcionar, genera por evolución un conjunto de reglas cuyas condiciones son sencillas de cumplir y que, por tanto, dan idéntico trato a situaciones muy variadas. El sistema les saca partido usándolas como reglas tácitas, indicadoras de qué se debe hacer a falta de información más detallada. La tosquedad de sus discriminaciones es causa de que cometan errores frecuentes, por lo que no adquieren mayor vigor. Conforme el sistema va adquiriendo experiencia, la reproducción y el cruzamiento llevan al desarrollo de reglas más específicas y complejas, que muy pronto adquieren la relevancia suficiente para dictar la conducta a seguir en casos concretos.

A la larga, llega a establecerse una jerarquía en el seno del sistema. La mayor parte de los casos son resueltos por estratos de reglas de excepción, ubicadas en los niveles inferiores; cuando la información disponible no es suficiente para satisfacer a ninguna de ellas, entran en acción las meta-reglas del nivel superior de la jerarquía. Esto permite disponer de experiencia aplicable a las situaciones nuevas, al tiempo que impide al sistema quedarse empantanado en situaciones muy específicas.

Las mismas características que confieren a los sistemas clasificadores evolutivos su capacidad de tratar situaciones novedosas son también adecuadas para afrontar aquellas en las que el beneficio o pérdida de determinada acción sólo se obtenga bastante después de haberla realizado. Las primeras jugadas de una partida de ajedrez, por ejemplo, pueden ser determinantes de la victoria o derrota finales.

La forma de preparar a un sistema clasificador para que afronte metas a largo plazo es que el programador le asigne una puntuación cada vez que completa una tarea. El beneficio derivado del éxito (o la pérdida del fracaso) se propagan a través de la jerarquía y refuerzan (o debilitan) a las reglas individuales, aun si el efecto de sus acciones sobre el resultado final fuese tenue. Con el transcurso de las generaciones, el sistema desarrolla reglas que actúan cada vez con mayor antelación para preparar las cosas con vistas a un resultado favorable. De este modo, se torna cada vez más capaz de anticipar las consecuencias de sus acciones.

Los algoritmos genéticos se han ensayado ya en contextos muy variados. Veamos algunos ejemplos. David E. Goldberg, de la Universidad de Illinois, ha desarrollado algoritmos que aprenden a controlar una red ficticia de conducciones de gas, modelada sobre la red auténtica que conecta los centros productores del sudoeste de los Estados Unidos con los consumidores del nordeste. El complejo consta de muchas ramificaciones, que transportan distintas cantidades de gas; los únicos elementos de gobierno son compresores, que permiten aumentar la presión en cualquier rama de la red, y válvulas, que regulan el flujo de gas desde y hacia los tanques de almacenamiento. Dado el importante desfase que separa la manipulación de válvulas y

compresores de los cambios reales de presión en las tuberías, no se dispone de soluciones analíticas del problema y los controladores humanos, como le sucede al algoritmo de Goldberg, han de aprender a base de práctica.

Su sistema no sólo atiende la demanda de gas con costes comparables a los conseguidos en la práctica, sino que ha desarrollado además una jerarquía de meta-reglas capaces de dar respuesta adecuada a las perforaciones de las conducciones (lo que ocurre con frecuencia en la realidad por culpa de máquinas excavadoras despistadas). Técnicas parecidas ha utilizado Lawrence Davis, de Tica Associates, Cambridge, Massachusetts, para el diseño de redes de comunicaciones; sus programas tratan de portar el máximo posible de datos con un mínimo de líneas de transmisión y de conmutadores para interconectarlas.

Investigadores de General Electric y del Instituto Politécnico Rensselaer aplicaron recientemente un algoritmo genético al diseño de una turbina polietápica de alta velocidad, como las de los motores que impulsan los aviones comerciales. Las turbinas —formadas por una multitud de sistemas de álabes, estáticos unos y en veloz rotación los otros, alojados todos ellos en el interior de un conducto más o menos cilíndrico— constituyen el problema central del desarrollo de motores, proyectos que pueden durar cinco años o más y llegar a consumir hasta 2000 millones de dólares.

El diseño de una turbina comporta al menos cien variables, cada una de las cuales toma distintos intervalos de valores. El espacio de búsqueda resultante contiene más de 10^{387} puntos. La "adecuación" de la turbina depende de lo bien que cumpla un conjunto de unas 50 restricciones, entre las que se cuentan las formas suaves y lisas de sus paredes interior y exterior o la presión, velocidad y turbulencia del flujo en diversos puntos del interior del cilindro. La evaluación de cada caso requiere hacer funcionar una simulación de un motor durante unos 30 segundos en una estación informática para diseño ingenieril.

Un ingeniero, trabajando solo, suele tardar unas ocho semanas en conseguir un diseño satisfactorio. Los programas conocidos por "sistemas expertos", que se valen de reglas de inferencia basadas en la experiencia técnica para pronosticar los efectos de un cambio en una o dos variables, pueden resultar muy útiles, pues orientan al diseñador en la búsqueda de modificaciones convenientes. Un segundo ingeniero, ayudándose de uno de ellos, tardó menos de un día en proyectar un motor con doble número de mejoras que el diseño efectuado manualmente en ocho semanas.

Pero los sistemas expertos se atascan pronto allí donde la consecución de ulteriores progresos requiera modificar simultáneamente muchas variables. La razón de que existan tales puntos muertos es que resulta prácticamente imposible aislar y clasificar la totalidad de efectos asociados a diferentes cambios múltiples y, no digamos, especificar las regiones del espacio de diseño en que continúa siendo válida la experiencia previa.

Para eludir estos puntos muertos, el proyectista ha de hallar nuevos elementos de solución. Aquí es donde interviene el algoritmo genético. Proporcionándole como base inicial las soluciones producidas por el sistema experto, un ingeniero tardó sólo dos días en hallar un diseño con tres veces más mejoras que la versión manual (y una vez y media más que las conseguidas con sólo el sistema experto).

Este ejemplo indica con claridad los puntos fuertes y las limitaciones de los algoritmos genéticos: su rendimiento es óptimo al explorar regiones complejas en busca de otras de mayores posibilidades. Pero, si una solución puede mejorarse sólo con efectuar pequeños cambios en unas cuantas variables, lo más conveniente es reforzar el algoritmo genético con otros métodos más tradicionales.

Aunque remeden los efectos de la selección natural, los algoritmos genéticos han operado hasta ahora a escala mucho menor que la evolución biológica. Mis colaboradores y yo hemos hecho operar sistemas clasificadores que contenían nada menos que 8000 reglas, pero este número corresponde al extremo más bajo de la viabilidad biológica. Los animales grandes que no corren peligro de extinción pueden contarse por millones, las poblaciones de insectos, por billones, y las bacterias, por trillones o más. Estos números tan enormes hacen resaltar mucho las ventajas del paralelismo implícito.

Conforme vayan siendo más corrientes los ordenadores de funcionamiento en paralelo a gran escala, resultará factible hacer evolucionar poblaciones informáticas cuyo tamaño se aproxime más a los de las especies naturales. De hecho, el algoritmo genético se adapta muy bien a tales máquinas. Cada procesador puede dedicarse a una única ristra, ya que las operaciones del algoritmo se concentran en ristras individuales o, a lo sumo, en parejas durante el cruzamiento. En consecuencia, puede procesarse en paralelo la población entera.

Es mucho todavía lo que hemos de aprender sobre sistemas clasificadores, pero el trabajo realizado hasta la fecha induce a pensar que podrán simular conductas de notoria complejidad. Rick L. Riolo, de la Universidad de Michigan, ha observado ya algoritmos genéticos que exhiben "aprendizaje latente" (fenómeno en el que un animal —una rata, por ejemplo— explora un laberinto sin recibir recompensa y luego es capaz de hallar mucho más rápidamente la comida escondida).

En el Instituto de Santa Fe, de los Estados Unidos, Forrest, W. Brian Arthur, John H. Miller, Richard G. Palmer y el autor nos hemos valido de sistemas clasificadores para la simulación de agentes económicos racionales, al menos en parte. Estos agentes evolucionan hasta el punto de actuar en un mercado de bienes y servicios simplificado teniendo en cuenta las tendencias, lo que genera alzas especulativas y desplomes de las cotizaciones.

Los mundos simulados en que moran estos agentes muestran muchas semejanzas con los ecosistemas naturales; exhiben analogías de fenómenos como la simbiosis, el parasitismo, "carreras de armamentos" biológicas, mimetismo, formación de nichos y especiación. Otros trabajos con algoritmos genéticos han esclarecido las condiciones en que la evolución favorecerá o no la reproducción sexual. Puede que, al final, la adaptación artificial retorne a la naturaleza la deuda contraída, haciendo que los investigadores comprendan mejor los ecosistemas naturales y otros sistemas adaptativos complejos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETIC ALGORITHMS AND SIMULATED ANNEALING. Compilación de Lawrence Davis, Morgan Kaufmann, 1987.

GENETIC ALGORITHMS IN SEARCH, OPTIMIZATION AND MACHINE LEARNING. D. E. Goldberg, Addison-Wesley, 1989.

GENETIC ALGORITHMS: PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE. Compilación de Richard Belew y Lashon Booker. Morgan Kaufmann, 1991.

ADAPTATION IN NATURAL AND ARTIFICIAL SYSTEMS. J. H. Holland, MIT Press, 1992.

COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS. J. H. Holland en *Daedalus*, vol. 121, n.º 1, páginas 17-30; invierno de 1992.

Pruebas de aliento en medicina

Desde la antigüedad se sabe que el aire espirado proporciona pistas para diagnosticar muchas enfermedades. Se están desarrollando nuevas pruebas respiratorias como alternativa a otras técnicas diagnósticas invasivas

Michael Phillips

Pensar en pruebas de aliento evoca la imagen de un policía ceñudo junto a un conductor detenido en la carretera. Cuando se sospecha que un conductor está intoxicado, se le hace soplar dentro de un pequeño instrumento que, al cabo de pocos segundos, indica la cantidad de alcohol presente en su sangre. Si dejamos de lado esta poco grata asociación con la embriaguez y la multa, las pruebas de aire espirado están convirtiéndose en una interesante técnica aplicada en las ciencias de la salud. Los médicos han empezado a utilizarlas para diagnosticar una amplia y creciente gama de enfermedades, sin necesidad de recurrir a los métodos invasivos, más peligrosos y molestos. Y además, las pruebas de aire espirado están suministrando importante información nueva sobre el funcionamiento bioquímico del organismo.

El actual interés por ellas deriva de los avances conseguidos en las técnicas analíticas, que cada vez permiten identificar una cantidad mayor de compuestos presentes en el aire espirado. Estudios clínicos realizados usando estos métodos han demostrado que la presencia de determinadas sustancias químicas en el aliento puede ayudar al diagnóstico precoz de muchas enfermedades.

MICHAEL PHILLIPS es director asociado de medicina en el Centro Médico St. Vincent, de Richmond, en Staten Island, y profesor clínico de medicina en la Facultad de Medicina de Nueva York, en Valhalla. Se graduó por la Universidad de Australia Occidental y ha ocupado puestos en las de Connecticut y Georgetown. Según él mismo, sus principales intereses se centran en la farmacología clínica del abuso del alcohol y en "las excreciones del cuerpo humano menos populares —el aire espirado y el sudor—, cuyas posibilidades para comprender los procesos metabólicos suelen menospreciarse".

Si el aire espirado contiene valiosa información es porque el aire de los alveolos pulmonares no está separado de la sangre de los capilares más que por una finísima barrera, llamada membrana alveolar pulmonar. Los compuestos orgánicos volátiles, tales como el alcohol o el metilmercaptano (el componente oloroso del ajo), pasan a través de la membrana alveolar desde el compartimento que tenga mayor presión de vapor hacia el que la tenga menor, del aire a la sangre o viceversa.

La detección de compuestos orgánicos volátiles en el aliento tiene una larga historia. Desde la época de Hipócrates, los médicos saben que el olor del aliento humano puede ayudar a hacer un diagnóstico. El médico avispado reconoce el olor dulce y afrutado de la acetona en enfermos con diabetes incontrolada, el mohoso y a pescado de la enfermedad hepática avanzada, el similar a la orina que acompaña a la disfunción renal o el olor putrefacto del absceso pulmonar.

Pero sin los métodos objetivos de análisis químico, las pruebas de aire espirado no podrían haber progresado como instrumento diagnóstico más allá del olfateo experto. El problema ya atrajo la atención de los científicos hace más de 200 años. Antoine Laurent Lavoisier, aclamado como el padre de la "revolución química" y famoso por su descubrimiento del papel del oxígeno en la combustión, fue también pionero de las pruebas de aliento.

En 1784, él y otro distinguido físico y matemático francés, Pierre-Simon, marqués de Laplace, analizaron el aire espirado por un cobaya. Observaron que el animal consumía oxígeno y espiraba dióxido de carbono. Este hallazgo fue la primera prueba directa del proceso de combustión de los alimentos en el cuerpo humano. En él se basan la bioquímica moderna y la expresión "hacer de conejo de indias", ya que Lavoisier confirmó su descubrimiento volviendo a realizar el experimento sobre sí mismo.

El aparato utilizado por Lavoisier incluía una ingeniosa innovación, que todavía sigue usándose de formas variadas: la trampa de aire. Este dispositivo acumula y concentra las sustancias componentes del aire espirado. La de Lavoisier era una solución química a través de la que se hacía pasar una gran cantidad de aire exhalado. El dióxido de carbono que contenía reaccionaba con la solución y formaba un precipitado visible.

El dióxido de carbono es relativamente fácil de detectar, ya que constituye el cinco por ciento del aire espirado, aproximadamente. Por desgracia, la mayoría de los otros compuestos volátiles presentes en el aliento lo están en concentraciones mucho menores, del orden de partes por millón o incluso menos. Su detección tuvo que esperar hasta mediados del siglo XIX, época en que se desarrollaron las llamadas técnicas colorimétricas, consistentes en que un compuesto orgánico interactúa con los reactivos que hay en una solución y produce un cambio en el color de la misma.

Uno de los primeros en utilizar los métodos colorimétricos fue A. Nebelthau, médico del Hospital Policlínico de Marburgo, en Alemania, quien construyó un aparato para analizar el aliento de los pacientes con diabetes mellitus. Cuando no está controlada, esta enfermedad se acompaña de un aumento excesivo de los niveles de

1. DISPOSITIVO para recoger aire espirado, construido en el laboratorio del autor. Este aparato proporciona al paciente aire purificado por carbón activado (*depósitos de la izquierda*). El aire exhalado pasa a través de un agente secante (*depósito de la derecha*) y se recoge para su posterior análisis. La pinza de la nariz asegura que el paciente respire por el tubo.

glucosa en sangre; a causa de ello, el organismo sintetiza grandes cantidades de acetona, un metabolito principal. Cuando Nebelthau hacía pasar el aire espirado a través de una trampa de yodo alcalino, observaba un cambio rápido e intenso del color de la solución. Este cambio ponía de manifiesto que se estaban excretando cantidades anómalas de acetona a través de los pulmones.

En 1874, el médico inglés Francis E. Anstie utilizó el análisis colorimétrico para estudiar el metabolismo del alcohol en el cuerpo humano. Su objetivo era resolver la controversia existente entre los fisiólogos, que pensaban que el cuerpo descomponía el alcohol de igual modo que los alimentos, y los activistas abstemios, para los que el alcohol se excretaba sin modificar, como una sustancia extraña. La trampa de aire espirado de Anstie contenía una solución de ácido crómico, que pasaba del marrón rojizo al verde en presencia de alcohol etílico. En una elegante serie de experimentos, demostró que la cantidad de alcohol excretado a través de los pulmones y de otras vías era mucho menor que la consumida. Por tanto, la mayor parte del alcohol consumido se metabolizaba. Anstie fue también quien propuso el límite que lleva su nombre: más de dos bebidas alcohólicas diarias pueden resultar perjudiciales para la salud, una idea muy apoyada por la investigación actual.

Los analizadores manuales de consumo de alcohol son hoy en día electrónicos: el sujeto sopla en un tubo de plástico y, gracias al mecanismo de un pistón provisto con un resorte, se retiene aproximadamente un centímetro cúbico de aire, que se oxida en una cámara combustible. La corriente eléctrica resultante es proporcional a la cantidad de alcohol presente en el aire. Transcurrridos unos pocos segundos, el analizador de aliento calcula y muestra digitalmente la concentración de alcohol en sangre.

Como las pruebas de alcoholemia ponen de manifiesto, es fácil detectar la presencia de un compuesto orgánico volátil en el aire espirado, si se han consumido previamente grandes cantidades de la sustancia en cuestión. Muchas pruebas de aliento requieren que el paciente tome una dosis de un precursor específico de una sustancia volátil. Se puede diagnosticar la presencia de una enfermedad cuando en el aliento aparezca una cantidad anormal de productos de metabolismo.

Los médicos utilizan este enfoque para diagnosticar una alteración intestinal llamada síndrome de malabsorción, por poner un caso. Esta condición produce diarrea crónica severa, ya que el intestino es incapaz de absorber los alimentos de manera normal. Una consecuencia del síndrome es que la mayor parte del azúcar presente en los alimentos llega intacta al colon y allí es metabolizada por las bacterias existentes. La actividad bacteriana libera hidrógeno, que pasa a la sangre y se excreta a través de los pulmones. Para la prueba, se administra al paciente una dosis oral de xilosa, un azúcar con cinco átomos de carbono que, en condiciones normales, se absorbe completamente en el intestino delgado. La aparición de grandes cantidades de hidrógeno en el aire espirado durante las horas siguientes confirma el diagnóstico de síndrome de malabsorción.

Esta prueba puede refinarse para detectar otras formas menos frecuentes de malabsorción, en las que el intestino no asimila bien determinados hidratos de carbono. Un paciente





2. LABORATORIO DE LAVOISIER para estudiar el aliento humano, posiblemente el primero de la historia. En este grabado, un sujeto respira oxígeno a través de un tubo, de manera que el químico francés pudiese estudiar el proceso de la respiración. Madame Lavoisier, sentada a la derecha, recoge los datos.

que tenga un déficit de lactasa en el intestino delgado producirá hidrógeno después de una dosis de lactosa, pero no si se le administra otro hidrato de carbono diferente, como la xilosa o la glucosa. También pueden diagnosticarse mediante pruebas de aliento otras alteraciones del intestino delgado. Así la proliferación bacteriana, condición que puede acompañar a cualquier forma de estancamiento en el intestino delgado, causada, entre otras, por las cicatrices tras un proceso quirúrgico o lesiones de los nervios que controlan la velocidad de propulsión de los alimentos a través del intestino.

Pruebas de aliento se utilizan también para identificar las lesiones pancreáticas. Jay A. Perman, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, realizó una serie de estudios de niños con fibrosis quística, enfermedad que daña gravemente el páncreas y los pulmones y suele ser mortal. Tras administrarles una dosis de almidón de arroz, un hidrato de carbono complejo, los niños que tenían comprometido el funcionamiento del páncreas no podían secretar una cantidad suficiente de amilasa para digerirlo en el intestino delgado. Eran las bacterias del colon las que completaban luego el proceso de digestión, produciendo hidrógeno que podía detectarse en el aire espirado.

El hidrógeno ayuda a diagnosticar diferentes enfermedades intestinales, pero también existen otros marcadores útiles. Por ejemplo, el carbono radiactivo 14 se emplea para detectar ciertas enfermedades del páncreas, combinándolo con otros compuestos metabolizados por las enzimas pancreáticas. La cantidad de dióxido de carbono radiactivo ($C^{14}O_2$) que aparezca luego en el aire exhalado indica el grado de funcionamiento del páncreas. Un páncreas enfermo puede que no produzca la cantidad de lipasas requerida para digerir las grasas presentes en la dieta diaria. El médico puede identificar esta alteración si en el aire espirado después de que el paciente haya consumido una dosis de triglicéridos, grasas de bajo peso molecular, marcados con el compuesto radiactivo, aparece una cantidad pequeña de $C^{14}O_2$.

El uso que ahora dan los médicos a las pruebas de aliento es, sobre todo, la detección de alteraciones del intestino delgado y del páncreas, pero estudios recientes han demostrado que esta técnica podría aplicarse al reconocimiento de otras enfermedades. Las basadas en el marcaje con carbono radiactivo 14 podrían ser especialmente útiles para diagnosticar dos de las dolencias del estómago más habituales en la práctica médica general: la úlcera péptica y la gastritis crónica. Ambas pueden

Pruebas de aliento en gastroenterología

Las úlceras pépticas y las gastritis crónicas pueden deberse a infección por *Helicobacter pylori.* Esta bacteria descompone una dosis de urea marcada con C^{14} en $C^{14}O_2$, que es absorbido por la sangre y aparecerá en el aire espirado.

En el síndrome de malabsorción, el intestino delgado es incapaz de absorber los azúcares. Aparecerá hidrógeno en el aliento. Una dosis de una sal biliar marcada con carbono 14 pondrá de manifiesto la proliferación bacteriana.

resultar de una infección por *Helicobacter pylori*, lo que parece ser bastante común. La infección suele escapar al diagnóstico porque confirmarla requiere de ordinario endoscopia, la introducción por el médico de un sistema de visualización en el estómago del paciente para recoger una muestra de la capa mucosa.

Barry J. Marshall, del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Virginia, ha demostrado que las pruebas de aire espirado son una alternativa no invasiva y muy fiable para la detección de infecciones por *Helicobacter*. *Helicobacter* posee una enzima, la ureasa, que no está presente en los seres humanos. Si un enfermo infectado consume una dosis de urea marcada con carbono 14, la ureasa de *Helicobacter* la descompondrá en su estómago. Uno de los metabolitos será $C^{14}O_2$, que es absorbido por la sangre y excretado a través de los pulmones.

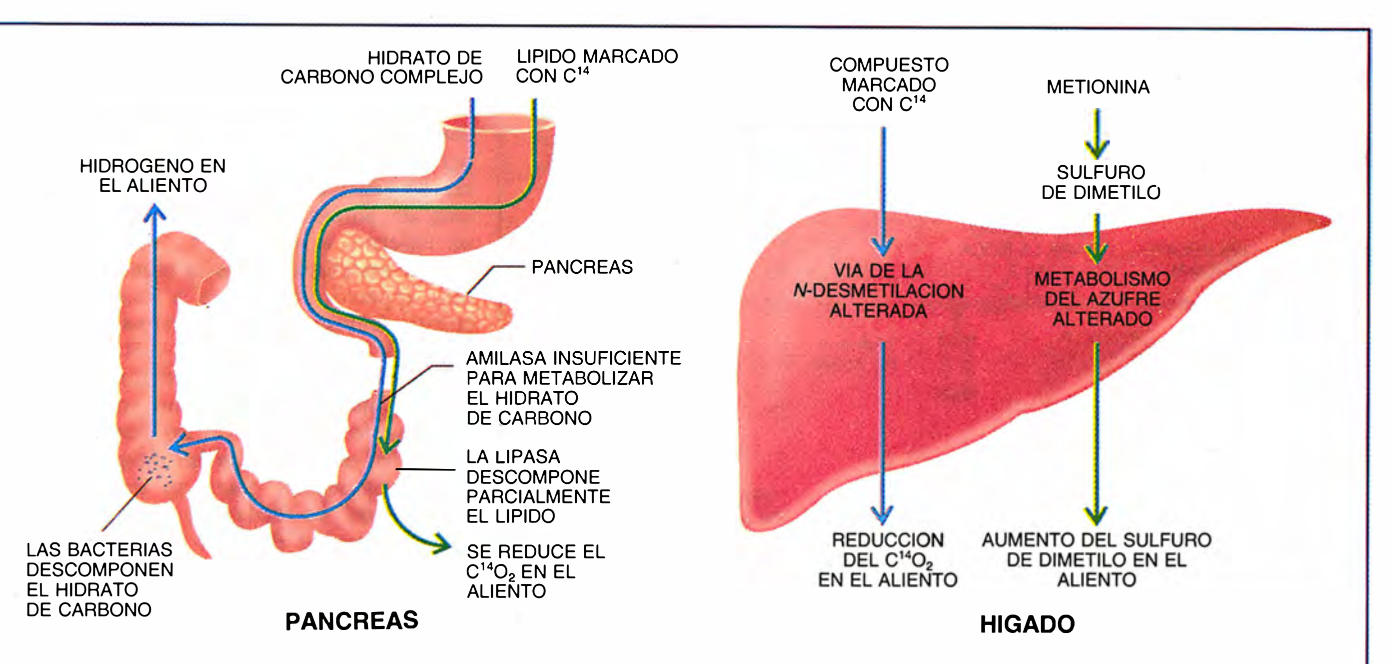
Otra prueba parecida está mostrándose útil para diagnosticar enfermedades hepáticas. La cirrosis y la hepatitis suelen pasar desapercibidas en sus fases iniciales. Cuando la bilirrubina, un metabolito principal de la hemoglobina, aumenta en sangre y produce la ictericia característica, el enfermo puede haber perdido ya más del 50 % de las células hepáticas.

Las pruebas de aliento pueden medir la incapacidad relacionada con rutas metabólicas específicas antes de que se manifieste la ictericia. En concreto, se puede valorar la vía de la N-demetilación en los microsomas hepáticos, que se ve afectada por las fases tempranas de cualquier tipo de alteración hepática. En un hígado normal, durante el proceso de demetilación se liberan cantidades importantes de dióxido de carbono. Para detectar la lesión hepática, el médico puede suministrar al paciente una dosis de un compuesto trazador, como son la aminopirina, la fenacetina o la galactosa, marcado con carbono radiactivo 14. Cualquier problema en la capacidad de N-demetilación se pondrá de manifiesto por una notable reducción en la velocidad de aparición del $C^{14}O_2$ en el aire espirado.

Hay otros marcadores de las enfermedades hepáticas. En condiciones normales, el hígado descompone el sulfuro de dimetilo, un metabolito volátil de la metionina. Pero si las funciones hepáticas están afectadas, la cantidad de sulfuro de dimetilo que "se escapa" al aliento es mayor.

El diagnóstico de enfermedades no es más que una de las áreas de aplicación de las pruebas de aire espirado. El seguimiento del consumo de drogas y fármacos sería otro campo seguramente fructífero, a pesar de su abandono, ya que la mayoría de estas sustancias tiene bajos pesos moleculares. Sus presiones de vapor a la temperatura del cuerpo pueden ser suficientemente elevadas para permitir que las propias sustancias o sus metabolitos sean propulsados hacia el aire alveolar en cantidades medibles. De hecho, las pruebas de alcoholemia se han convertido en algo tan usual que resulta curioso que no se hayan hecho más intentos de aplicarlas a otras drogas. Los metabolitos de la marihuana se pueden detectar en el aire exhalado durante varios días después del consumo.

Las pruebas de aliento pueden servir también para poner de manifiesto diferencias en el comportamiento metabólico de las personas. Hace mucho que se observó que los asiáticos reaccionan al consumo de alcohol de forma diferente a la mayoría de los caucasianos. Muchos asiáticos presentan un rubor marcado después de beber, así como reacciones más severas, del tipo de palpitaciones, náuseas y malestar. Las pruebas de aire espirado han confirmado que las concentraciones de acetilaldehído, un metabolito volátil del alcohol, son considerablemente mayores en los asiáticos que en los caucasianos después del consumo de una bebida alcohólica. Investigaciones ulteriores han puesto de manifiesto que más del 80 por ciento de los asiáticos suelen tener niveles relativamente bajos de aldehído deshidrogenasa en los microsomas del hígado, por lo que una dosis de alcohol produce un aumento relativamente mayor del acetilaldehído en la sangre, causa del rubor y de los otros síntomas desagradables.



La lipasa metaboliza los lípidos; su deficiencia resultará en una disminución de la cantidad de $C^{14}O_2$ en el aliento tras administrar un lípido marcado con carbono 14. El hidrógeno revelará la insuficiencia de amilasa.

Pueden detectarse perturbaciones de la vía de la *N*-demetilación tras administrar aminopirina, fenacetina o galactosa marcadas con C^{14}. Se puede valorar el metabolismo del azufre con metionina, que genera sulfuro de dimetilo.

Otra utilización de eficacia comprobada es para supervisar la exposición de trabajadores industriales a sustancias disolventes y derivados del petróleo, potencialmente perjudiciales. Varias de estas sustancias tóxicas se pueden medir fácilmente en el aliento humano. Edo D. Pellizzari, actualmente en el Instituto Triangular de Investigación de North Carolina, y sus colaboradores de la Oficina de Protección del Medio Ambiente estadounidense, han desarrollado sensibles pruebas de aire espirado que demuestran que las sustancias tóxicas pueden contaminar el aire más allá del recinto de la fábrica. Hoy se sabe que el aire interior del centro de trabajo, de la oficina o del hogar puede estar contaminado por pequeñas cantidades de diversos compuestos, algunos de ellos carcinogénicos. En un estudio realizado por Pellizzari y sus colaboradores, se observó que ciertos trabajadores de almacenes habían ingerido compuestos volátiles que podían proceder de los disolventes y plásticos de alfombras y revestimientos.

Todas las pruebas de aliento que hemos descrito hasta ahora detectan la presencia de un compuesto orgánico volátil consumido previamente (como el alcohol) o los metabolitos de algún precursor. Los investigadores han intentado dar un paso más y detectar los compuestos volátiles contenidos en el aire espirado en circunstancias normales. En 1971, Linus Pauling describió un método elegante y sencillo para el microanálisis del aliento normal. Su procedimiento hacía pasar el aire espirado a través de una trampa fría, consistente en un tubo de acero inoxidable congelado mediante hielo seco, y analizaba luego el condensado mediante cromatografía de gases y espectroscopía de masa. Observó unos 250 compuestos diferentes. Este número sorprendió por su magnitud e indicó que la composición del aire espirado humano era más compleja de lo que se había sospechado en un principio. Otros laboratorios confirmaron sus resultados y actualmente se ha conseguido aislar alrededor de 400 compuestos orgánicos volátiles del aliento humano.

Si hace más de veinte años que se sabe cómo hacerlo, ¿por qué no se ha convertido ya en rutinario su estudio? Déjenme intentar dar respuesta a esta cuestión invitando al lector a que me acompañe en una visita imaginaria a mi laboratorio del Hospital Bayley Seton, en Staten Island, Estados Unidos. Conforme entramos, le voy señalando los instrumentos que utilizamos para analizar los compuestos del aire espirado: trampas de desorción térmica, cromatógrafos de gases y un espectrómetro de masa, todos ellos gobernados por ordenadores.

Pero, pregunta usted, ¿cómo se toman realmente las muestras de aliento? Y yo le muestro nuestro aparato de recogida de muestras, lo que constituye un anticlímax. Es un dispositivo artesano y de aspecto bastante extraño sobre un carrito con ruedas. Varios metros de tubo de plástico se extienden de forma aparentemente desordenada. Un cajón de madera esconde una bomba y todavía más metros de tubos. El conjunto contrasta curiosamente con la austera elegancia de los instrumentos analíticos.

Este choque entre estilos tecnológicos es habitual en los laboratorios que estudian los componentes del aliento. Los instrumentos analíticos se adquieren "en la tienda", mientras que el recolector de muestras es un artilugio sin normalizar ideado por personas ingeniosas. A pesar de los dos siglos de experiencia adquirida desde la época de Lavoisier, todavía no existe un acuerdo generalizado sobre la mejor manera de atrapar una muestra concentrada de aire exhalado.

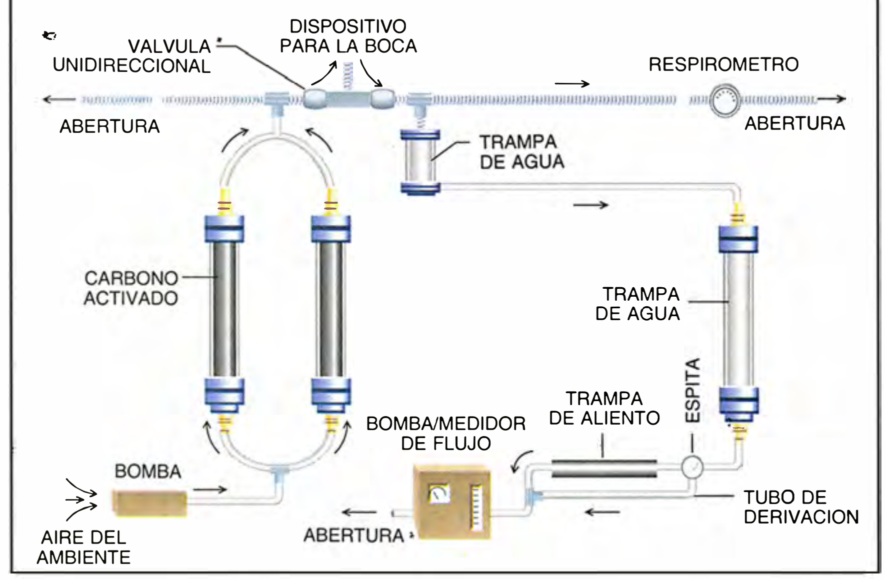
Buena parte del desacuerdo se debe a ciertas dificultades que presenta el diseño de tal equipo. En primer lugar y sobre todo, el paciente no debe tener problemas para soplar dentro del aparato. Soplar a través de un dispositivo que contenga un líquido puede ser un trabajo duro, lo que quizás explique por qué los sujetos de Lavoisier se desnudaban hasta la cintura antes de usar su invento. Tampoco debía resultar fácil soplar en el equipo de Pauling, que incluía un tubo de 1,5 metros de longitud y medio centímetro de diámetro. Además, la parte donde se acopla la boca debe ser desechable para evitar la transmisión de enfermedades infecciosas de un enfermo a otro.

La contaminación de la muestra es otro aspecto importante a tener en cuenta. Incluso la habitación más limpia está contaminada con sustancias químicas volátiles procedentes de fuentes muy diversas, como son los sistemas de ventilación o los disolventes de los adhesivos de las moquetas. Estos compuestos traza se detectan como "ruido" de fondo. Por si fuera poco, la humedad del aire espirado se condensa en pequeñas gotas dentro del tubo, lo que puede contaminar la trampa químicamente limpia.

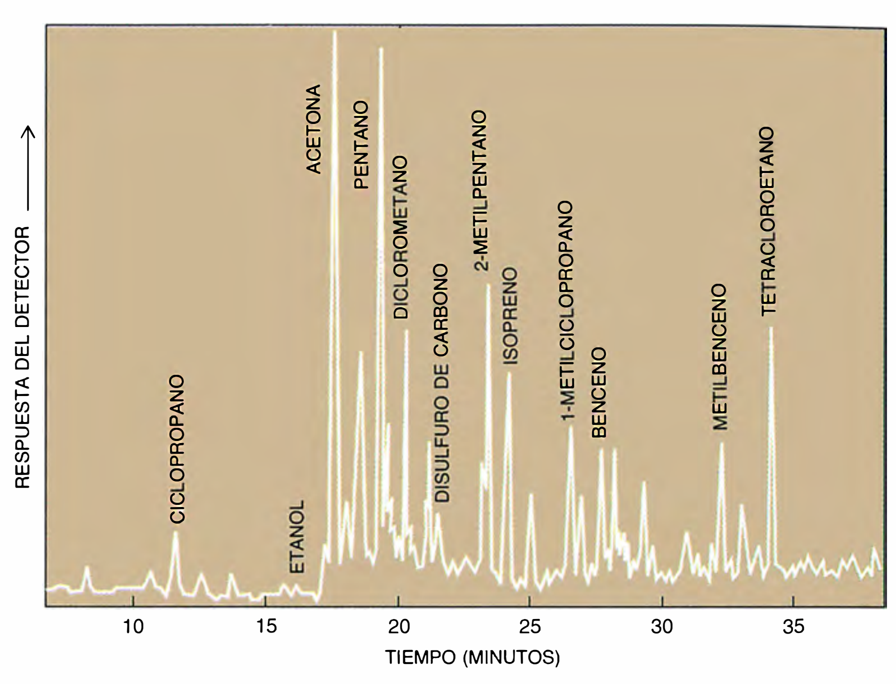
Para conseguir resultados claros, el aparato debe poder recoger muestras del aire originado en la zona profunda de los pulmones, ya que el aire espirado no es un gas homogéneo.

Recogida del aliento humano

Este mecanismo, que se halla en el laboratorio del autor, está montado sobre un carrito con ruedas para poder trasladarlo hasta la cama de los enfermos (*véase la ilustración 1*). El aire de la habitación se bombea a través de carbono activado, lo que permite aportar al voluntario aire químicamente puro. El aire alveolar exhalado pasa a través de una trampa de agua para eliminar la humedad y luego atraviesa un tubo de acero inoxidable, que retiene los compuestos orgánicos volátiles. Un sistema de válvulas unidireccionales evita el reflujo del aire. El respirómetro mide la cantidad de aire de cada exhalación.



Los primeros 150 mililitros de una espiración son aire de la "zona muerta", la parte superior de las vías respiratorias, donde no tiene lugar ningún intercambio de gases (un individuo sano exhala en cada espiración medio litro o más de aire). En fin, la trampa debe capturar sólo los compuestos volátiles de interés, dejando que el resto de sustancias, incluidos el nitrógeno y el oxígeno (que juntos constituyen más del 90 por ciento del aire exhalado), pasen sin impedimentos.



3. COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES en el aire espirado por el ser humano, identificados por espectroscopía de masa; aparecen como picos alargados. Sólo algunos de los más de 50 compuestos detectados tienen su etiqueta. En otros análisis se ha llegado a diferenciar unos 400 compuestos.

Hablando en términos generales, existen tres tipos de trampas de aliento: químicas, criogénicas y adsorbentes. Ninguna de ellas es perfecta. Las trampas químicas suelen utilizar la tradicional "química húmeda": se hace pasar el aire espirado a través de una solución reactiva que captura un compuesto determinado, como el etanol o la acetona. El método es sencillo y directo, resultando fácil medir el derivado capturado, que generalmente adquiere un color determinado. Los inconvenientes son una escasa sensibilidad y el esfuerzo físico que debe realizar el paciente.

En las trampas criogénicas, los compuestos volátiles se capturan mediante un proceso de congelación. El aire exhalado pasa a través de un tubo inmerso en fluidos refrigerantes; por ejemplo, nitrógeno líquido a una temperatura de −196 grados Celsius. Por desgracia, una trampa fría congela también el agua y el dióxido de carbono presentes en el aire espirado, y el mecanismo se atasca fácilmente por la formación de hielo.

Las trampas adsorbentes son el método más conveniente y el de uso más generalizado hoy en día. Los compuestos volátiles se capturan por un mecanismo de unión con sustancias como el carbono activado o las resinas adsorbentes. Los últimos avances en el proceso de desorción térmica, controlado por microprocesadores, que automáticamente desprenden y concentran los compuestos atrapados, han mejorado aún más las ventajas de esta técnica.

Entre los investigadores que han llevado a cabo experimentos muy sensibles utilizando trampas adsorbentes se encuentran Pellizzari, M. Sydney Gordon, de Battelle, Jack O'Neill, del Instituto de Investigación ITT en Chicago, y E. S. Kovaleva y R. Liedeman, del Centro de Investigación de Salud Mental, en Moscú.

El aparato que hemos construido mi colaborador Joel Greenberg y yo ilustra la forma en que las trampas adsorbentes pueden superar la mayoría de las dificultades técnicas (*véase el recuadro*). En nuestro dispositivo, el paciente inhala aire purificado y lo exhala en un tubo. Un sistema de válvulas asegura que no se produzca un reflujo del aire exhalado hacia el depósito de aire puro. No existe prácticamente ninguna resistencia a la espiración, ya que el tubo es ancho (tiene casi tres centímetros de diámetro) y las válvulas requieren muy poca presión para abrirse y cerrarse. Incluso enfermos graves pueden pasar por la prueba sin grandes molestias.

No se recoge ninguna muestra de la primera parte del aire espirado, el proveniente de la zona muerta. Sólo el aire alveolar, procedente de la zona profunda de los pulmones, se extrae del tubo. En cinco minutos de recolección se consiguen 10 litros de aire alveolar. La muestra se deseca en trampas de agua y atraviesa un tubo de acero inoxidable en el que el carbono activado y la resina adsorbente capturan los compuestos volátiles. Más tarde, un desorbedor térmico los recupera automáticamente y los concentra más de 200.000 veces, para su posterior separación mediante cromatografía de gases y espectrometría de masa.

El principal inconveniente de la trampa adsorbente es que puede tener más afinidad por determinados compuestos que por otros. La cromatografía de gases es otra fuente de variabilidad. Separa las muestras en un tubo largo y estrecho (la llamada columna de separación), cuya composición química influye sobre el número de compuestos detectables. El resultado final es que nuestro método sólo consigue entre 50 y 60 compuestos. Este número, relativamente pequeño, es más que suficiente para objetivos de investigación.

En el estado actual de nuestros conocimientos, el microanálisis de compuestos volátiles del aliento ha planteado más preguntas de las que ha contestado. La primera y más acuciante se refiere a la procedencia de los compuestos. El origen de la mayoría de ellos es todavía desconocido. Algunos podrían ser contaminantes ambientales. Por ejemplo, encontramos disulfuro de carbono en el aire espirado por todos los voluntarios. Podría ser un producto de descomposición de los aminoácidos que contienen azufre, pero, por otra parte, también lo hemos encontrado en muestras de aire tomadas en la ciudad de Nueva York y sus alrededores. Determinar su origen no es tema baladí, pues diversos estudios han puesto de manifiesto que la exposición ambiental al disulfuro de carbono puede acelerar la aparición de arterioesclerosis y enfermedades de las arterias coronarias.

Otro problema es la pura sobrecarga de datos. Es difícil identificar un marcador de enfermedad entre cerca de 400 compuestos diferentes. Incluso si se observan cantidades anormales de un compuesto en pacientes

que presentan una enfermedad determinada, los médicos deben recurrir a análisis estadísticos rigurosos antes de poder asegurar que los resultados no son producto del azar.

Estudios realizados por Gordon y O'Neill sirven para ejemplificar las promesas y los riesgos que encierra la identificación de nuevos marcadores de enfermedades en el aliento. Sus análisis del aire espirado por enfermos de cáncer de pulmón han encontrado concentraciones anormalmente elevadas de acetona, metiletilcetona, *n*-propanol, tolualdehído y oxepanona. Son hallazgos muy interesantes, ya que una prueba de aliento para la detección temprana del cáncer pulmonar podría convertirse en una herramienta muy valiosa de la práctica médica. Pero los médicos necesitan información clínica más sólida acerca de estas pruebas, que ha de incluir su sensibilidad, su especificidad y su valor predictivo positivo. Hasta que no se disponga de ella, las pruebas de aliento para el cáncer de pulmón seguirán siendo tan sólo una intrigante posibilidad.

Esta falta de información limita el valor clínico de la mayoría de pruebas actuales de este tipo. Sólo algunas de ellas se aceptan como herramientas diagnósticas, pero todas son indicadores prometedores de posibles desarrollos futuros. Por ejemplo, la medida de la dimetilamina y de los ácidos grasos volátiles del aliento podría permitir que los médicos diagnosticasen enfermedades de los riñones y del hígado en fases iniciales, antes de que aparezcan los primeros síntomas, sin necesidad de usar otros procedimientos invasivos ni de administrar precursores.

Estas pruebas ofrecen además claves interesantes para el estudio de los fundamentos bioquímicos de muchas enfermedades cuyas causas son todavía desconocidas. En concreto, se sabe que, en determinadas condiciones patológicas, aumenta en el aliento la presencia de dos alcanos, el pentano y el etano. Edward J. Zarling, del Centro Médico de la Universidad de Loyola, ha encontrado niveles elevados de pentano en el aire espirado por pacientes con infarto agudo de miocardio, artritis y esclerosis múltiple. Kovaleva y Liedeman descubrieron que los pacientes esquizofrénicos agudos tenían concentraciones altas de pentano, que volvían rápidamente a niveles normales conforme su estado mejoraba durante el tratamiento. También se han observado niveles elevados de metano en el aire espirado por seres humanos y animales con déficit de vitamina E y de minerales traza, como el selenio y el cobre.

La aparición de pentano y etano en el aliento parece deberse a una acumulación de radicales libres de oxígeno en células lesionadas, que atacan a los ácidos grasos de la membrana celular, proceso en el que se liberan los alcanos. Los efectos tóxicos de los radicales libres han adquirido una importancia creciente en los últimos años, ya que parecen ser los mediadores de las fases finales de la lesión celular consecuente a una amplia diversidad de causas.

¿Qué se requeriría para que las pruebas de aliento pasasen del ámbito de la investigación a la práctica clínica habitual? Los dos requisitos más acuciantes son la simplificación y la evaluación clínica. La simplificación es esencial, ya que los métodos que actualmente se utilizan para recoger, concentrar y analizar las muestras de aire son demasiado complicados y caros para un uso generalizado.

La situación podría cambiar durante el próximo decenio. Nuevos instrumentos de análisis se adivinan en el horizonte; espectroscopios de láser infrarrojo o espectrómetros que proporcionen lecturas inmediatas podrían detectar niveles bajos de compuestos orgánicos volátiles en muestras de aliento sin concentrar. Si a esto se uniesen mejoras en los procedimientos de recogida de muestras, podrían realizarse estudios clínicos detallados sobre el valor diagnóstico de las pruebas. Los médicos y los enfermos del siglo próximo puede que las consideren como ahora a los rayos X: una técnica de reconocimiento barata y conveniente, que puede ayudar a diagnosticar muchas enfermedades en sus fases iniciales y más fácilmente tratables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BREATH TESTS: PRINCIPLES, PROBLEMS, AND PROMISE. C. W. Lo, E. A. Carter y W. A. Walker en *Advances in Pediatrics*, vol. 29. Dirigido por Lewis A. Barness. Year Book Medical Publishers, 1982.

THE DIAGNOSTIC POTENTIAL OF BREATH ANALYSIS. A. Manolis en *Clinical Chemistry*, vol. 29, n.º 1, págs. 5-15; enero de 1983.

CLINICAL APPLICATION OF BREATH HYDROGEN MEASUREMENTS. Jay A. Perman en *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, vol. 69, n.º 1, págs. 111-115; enero de 1991.

ION-TRAP DETECTION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN ALVEOLAR BREATH. Michael Phillips y Joel Greenberg en *Clinical Chemistry*, vol. 38, n.º 1, págs. 60-65; enero de 1992.

Estrategias reproductoras de las ranas

El conocido paso de huevo a renacuajo es sólo uno de los muchos métodos que siguen. Otros son: ir de huevo a ranita, incubar los huevos o albergar los renacuajos en el estómago de la madre

William E. Duellman

El naturalista alemán A. J. Rösel von Rosenhoft publicó en 1758 lo que entonces constituyó el estudio definitivo del desarrollo de la rana. Las detalladas descripciones y los meticulosos dibujos de su *magnum opus* proporcionaron al mundo una visión inmediata del ciclo biológico de una rana, desde el huevo al adulto tetrápodo, pasando por el renacuajo.

Pero ahora sabemos que el trabajo de Rosenhoft, por basarse enteramente en la rana verde comestible, *Rana esculenta*, una rana europea común, no describe más que una de las muchas estrategias de ciclos biológicos que presentan las ranas como grupo. A los herpetólogos (los zoólogos que estudian las ranas y otros anfibios, junto con los reptiles), entre los que me incluyo, les resulta cada vez más claro que muchas especies no se ajustan al ciclo biológico de la rana verde europea. Hay ranas que siguen su modelo estereotipado de desarrollo (y depositan miles de huevecillos, que terminan convirtiéndose en renacuajos nadadores), pero hay muchas más que han desarrollado estrategias reproductoras diferentes, algunas de las cuales rozan lo inverosímil. Al pasar revista a mis 40 años de biólogo de campo, me vienen a las mientes dos ideas. La primera es que las ranas son fuente inagotable de fascinación; la segunda es que no son muy convencionales.

Ranas y sapos (a los que, a partir de ahora, llamaré simplemente ranas) son miembros del orden de anfibios anuros, término que en griego significa "sin cola" y es adecuado si se considera la forma adulta. A lo largo de los 200 millones de años transcurridos desde que los anuros aparecieron por primera vez, según el registro fósil, se han diferenciado en 24 familias y más de 3800 especies. Desconocemos el número exacto de especies, pues siguen descubriéndose y catalogándose nuevas ranas al sorprendente ritmo de varias docenas anuales. Otro indicador del éxito del grupo es el grado de dispersión de sus miembros por todo el mundo. En la actualidad, las ranas habitan en todo el planeta, excepto en la Antártida, y se han adaptado a gran variedad de ambientes, sin exceptuar desiertos, bosques y praderas; algunas especies viven incluso a altitudes superiores a los 5000 metros, en las montañas del Himalaya y de los Andes.

No debe sorprender, empero, su mayor abundancia en las regiones tropicales. Una de las localidades más ricas que conozco, por ejemplo, es un pequeño puesto fronterizo en la cuenca amazónica de Ecuador, llamado Santa Cecilia, donde mis colegas y yo recolectamos una vez 56 ranas diferentes en una sola tarde. Allí vive un total de 81 especies distintas (que es precisamente el número de especies de ranas que se encuentran en el conjunto de los Estados Unidos). Aunque la diversidad de ranas de Santa Cecilia sea excepcional, no lo es encontrar 40 o más especies en trechos de pluviselva no superiores a los 2 km^2.

Las ranas de Santa Cecilia son notables por otra razón más, pues epitomizan una tendencia clave en la evolución de las ranas, a saber, el movimiento de huida del agua hacia la tierra. De las 81 especies allí encontradas, 35 son terrestres durante uno o más estadios de su desarrollo.

WILLIAM E. DUELLMAN tuvo la primera oportunidad de estudiar ranas cuando era estudiante en la Universidad de Michigan. Desarrolló entonces un interés por las ranas y su biología reproductora que le ha durado toda su vida. Tras doctorarse en Michigan, se incorporó al claustro de la Universidad de Kansas, donde es profesor en el departamento de sistemática y ecología, conservador de la división de herpetología del Museo de Historia Natural y director del Centro para la Diversidad Biológica Neotropical. Sus trabajos de campo le han llevado por toda América del Norte y del Sur, a Africa y a Australia. El resultado de sus estudios han sido unas 250 publicaciones, entre ellas los libros *Hylid Frogs of Middle America* y, con Linda Trueb, *Biology of Amphibians*.



1. RANAS del género *Centrolene* en cópula, fotografiadas en Colombia. Su nombre vulgar es ranas de cristal, en alusión a su transparencia, que, como puede apreciarse a la derecha, hace visibles los huevos de la hembra. Los huevos se desarrollan sobre hojas que cuelgan encima de corrientes de agua (*abajo*).

Ahora bien, esta propensión a la vida en tierra choca frontalmente con un requisito fundamental del grupo: los huevos de los anfibios (como los de los peces) deben mantenerse continuamente húmedos, ya que la membrana semipermeable del huevo ofrece poca protección frente a la desecación. Por lo demás, la práctica totalidad de los machos carece, al igual que los peces, de órgano intromitente, o pene, por lo que la inseminación de los huevos ha de hacerse externamente, una vez éstos han pasado por la cloaca de la hembra (la abertura reproductora y excretora combinada).

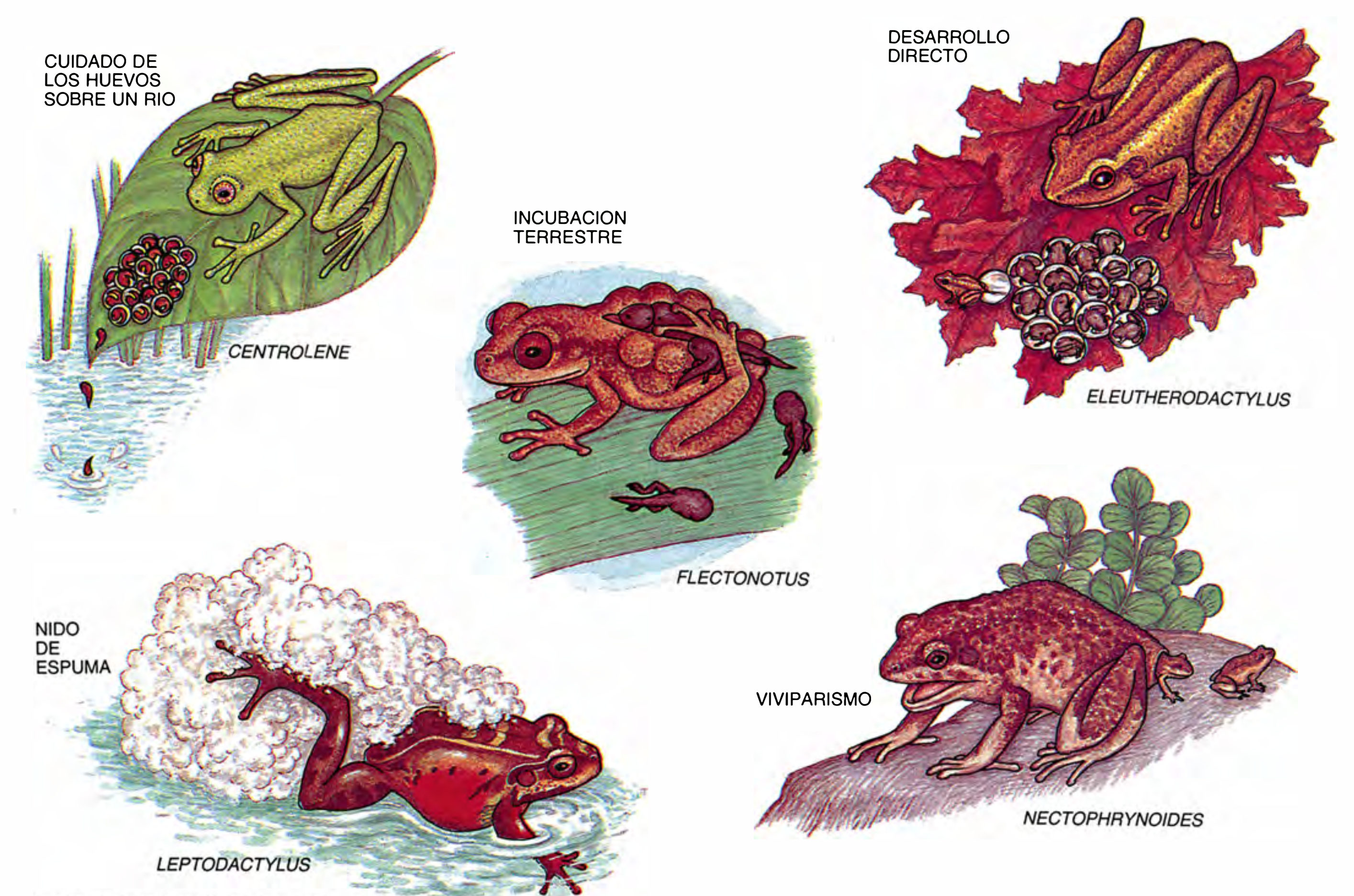
La forma de conseguir esta proeza es que el macho agarra a la hembra (generalmente alrededor de las axilas) en un abrazo de apareamiento denominado amplexo. En la mayoría de las especies de clima templado, el apareamiento tiene lugar en el agua, de modo que la puesta de huevos (y los renacuajos acuáticos en que terminan convirtiéndose) no corre nunca el riesgo de desecarse. La situación es muy distinta en tierra, pues la lluvia no está garantizada y los niveles de humedad pueden fluctuar.

En vista de tales condicionamientos fisiológicos, ¿cómo es posible que las ranas hayan colonizado la tierra con tanto éxito? Y, dadas las circunstancias rigurosas que predominan en tierra, ¿qué ventaja les ha reportado hacerlo desde el punto de vista evolutivo? La respuesta a la primera pregunta tiene varias partes. Para empezar, la mayoría de las ranas terrestres habitan en las pluviselvas tropicales; los elevados niveles de humedad allí imperantes (cercanos al 90 por ciento) reducen el riesgo de deshidratación y la temperatura ambiente del aire (de 25 a 30 grados Celsius de promedio) procura un crecimiento rápido.

Lo que quizá sea más significativo es que las ranas terrestres se ajustan a muy pocos estereotipos; durante sus 200 millones de años de existencia han desarrollado numerosas (y, con frecuencia, sorprendentes) adaptaciones para la vida en tierra. Dado que muchas de estas adaptaciones han surgido múltiples veces, es de suponer que confieran una poderosa ventaja selectiva. Hay que recordar, en fin, que la vida terrestre no implica necesariamente carencia de agua; muchas especies ponen sus huevos en las pequeñas charcas temporales que se forman después de una fuerte lluvia o en lugares tales como la zona de salpicaduras de cascadas, en los que la humedad alcanza un grado inhabitual. En consecuencia, no son terrestres en el sentido estricto de la palabra.

La segunda pregunta es más difícil, pues lo es validar su respuesta. La mayoría de los herpetólogos cree que la tierra ofrece un cierto respiro frente a los depredadores acuáticos, del tipo de peces e insec-





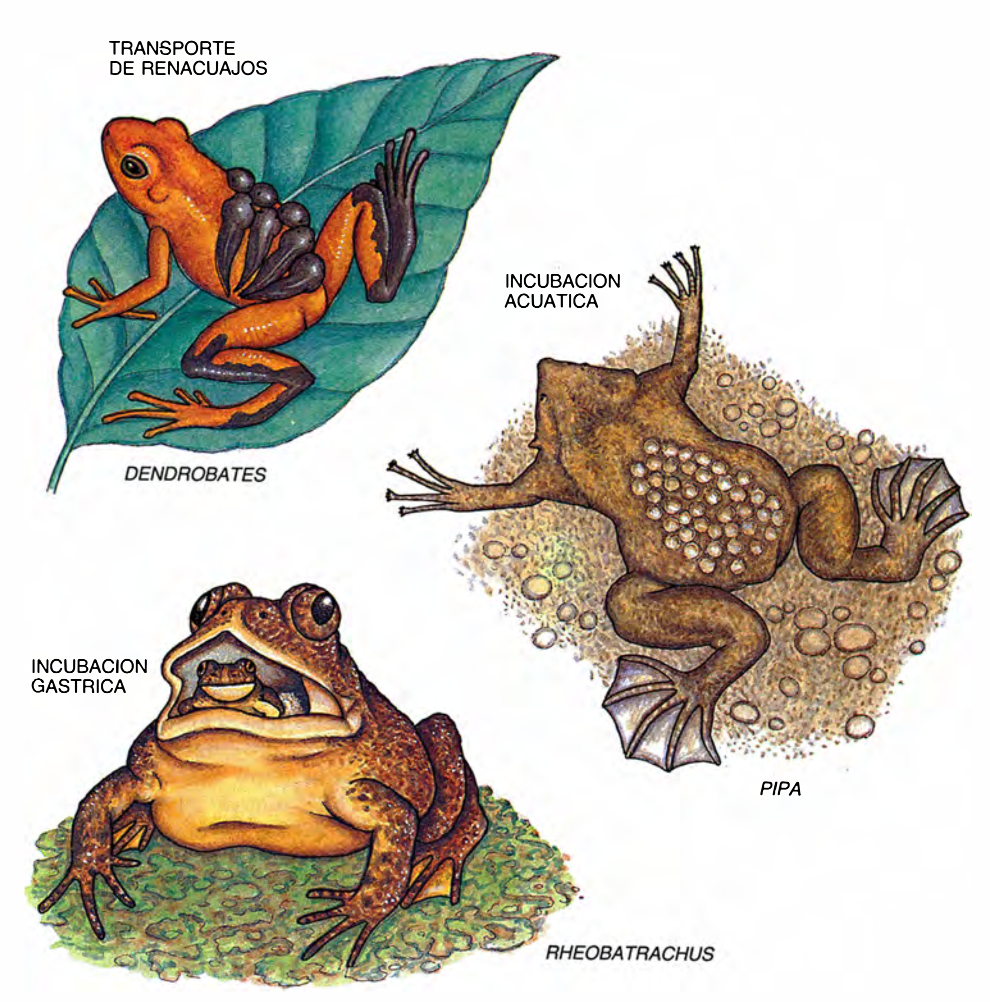
2. TACTICAS REPRODUCTORAS de distintas especies de ranas; son muy variables y algunas rozan lo improbable. En esta ilustración, el nombre del género aparece en la parte inferior derecha y la estrategia reproductora se resume en la superior

tos (y sus larvas acuáticas), abundantes en los estanques y ríos tropicales. El problema presenta toda su gravedad durante el estadio de huevo, período en que la mortalidad puede alcanzar valores muy altos, de hasta el ciento por cien. Rica en proteínas y polisacáridos, la cápsula membranosa del huevo de las ranas proporciona un manjar codiciado por muchísimos depredadores. Según mi colega Linda Trueb, de la Universidad de Kansas, las ranas han conseguido lo mejor de ambos mundos: al adaptarse a tierra han reducido los riesgos de la depredación; conservando la capacidad de vivir en el agua, pueden retornar a ella cuando les conviene. Es claro que las patas traseras saltadoras de los adultos les permiten cambiar rápidamente de hábitat, pero hay algunos renacuajos cuya cola muscular les capacita para serpentear sobre el suelo.

En realidad, muchas especies sólo completan en tierra el estadio de huevo y vuelven al agua cuando son renacuajos. En resumen, las estrategias adaptativas de las ranas terrestres abarcan una amplia gama de comportamientos. Uno de los más simples y comunes es el de poner los huevos cerca del agua. Es frecuente ver puestas de huevos pegadas a rocas o vegetación pendientes sobre un estanque tropical o un riachuelo de montaña; desde esta posición ventajosa, los renacuajos caen limpiamente al agua al hacer eclosión. De esta manera ponen sus huevos todas las ranas hoja y las ranas de cristal (así llamadas porque la piel de su vientre es transparente). Otras especies los depositan en depresiones someras adyacentes a estanques; cuando el nido se inunda, los renacuajos son arrastrados directamente a la masa de agua mayor.

Otra alternativa más elaborada, y comprobada en al menos cuatro familias, consiste en envolver los huevos en espuma protectora. A medida que se ponen los huevos, uno u otro de los progenitores mueve vigorosamente sus patas posteriores, mezclando aire, esperma, huevos, secreciones cloacales y, a veces, agua. Cuando la masa espumosa se seca, su exterior se torna viscoso y hasta duro, sirviendo como protección de los huevos frente al daño físico. Al mismo tiempo, el interior, repleto de huevos, permanece líquido durante al menos 10 días, lo que les permite sobrevivir a cortos períodos de sequía.

Puede que las estrategias de poner huevos en tierra conduzcan a una mayor supervivencia de la puesta, pero es evidente que no afectan a la mortalidad en el estadio de renacuajo acuático. De hecho, probablemente sea la presión de depredación que opera a nivel de renacuajo la que explique otro rasgo de la biología de las ranas: su paso desde ríos y lagos a pequeñas charcas o pozas, que sólo contienen agua durante unos pocos días o semanas cada vez. La formación de tales charcas temporales es corriente en agujeros de árboles, en la base de las plantas arborícolas llamadas bromeliáceas o en pequeñas cavidades del suelo. Como son demasiado efímeras para sostener a una población de depredadores, proporcionan un ambiente relativamente seguro para el desenvolvimiento de todos los estadios del ciclo biológico de la rana. El gran riesgo, naturalmente, es que el agua



izquierda. Una de las más insólitas se da en el género *Rheobatrachus*: una vez el macho ha fertilizado los huevos, la hembra los engulle y los incuba en su estómago.

se evapore antes de que los huevos hagan eclosión o de que los renacuajos completen su desarrollo, en cuyo caso perece toda la puesta.

Otro procedimiento, evolutivamente más reciente, consiste en la prolongación del estadio de huevo. En lugar de producir huevos que, al eclosionar, originen renacuajos de vida libre, los de algunas ranas generan ya ranitas de cuatro patas, lo que se conoce como desarrollo directo. Reduce de modo importante la mortalidad, aunque también se producen menos huevos, pues cada embrión precisa una gran cantidad de vitelo del que echar mano durante el largo período de maduración. El desarrollo directo está asociado a nueve familias de ranas, entre las que se incluye el inmenso género tropical americano *Eleutherodactylus* y otros géneros emparentados; también se da en muchas especies australianas, asiáticas y africanas. La eliminación del estadio de renacuajo de vida libre, que se alimenta por su cuenta, caracteriza a cerca de 800 especies de ranas, es decir, al veinte por ciento de las conocidas.

La mayoría de las ranas con desarrollo directo vive en selvas pluviosas o en bosques nubosos, pero uno de sus géneros más interesantes, si bien poco conocido, es *Breviceps*, la rana de lluvia africana. Como sugiere su nombre, el animal sólo aparece sobre el suelo durante los chubascos intensos. Es mucho lo que se ignora de la biología de este esquivo animal, pero se sabe que los adultos forman parejas durante la estación reproductora. Cuando llueve, salen de sus madrigueras subterráneas y absorben el agua a través de la piel, con lo que abastecen de fluido su vejiga y otros tejidos corporales.

Debido a lo relativamente diminuto de su tamaño, el macho no puede conseguir el amplexo con la hembra, grande y redonda, sino que se pega a su dorso. Con el macho así montado, la hembra excava en el suelo y procede a poner los huevos, que son fecundados por su pareja ampléctica. Periódicamente, la hembra moja los huevos con agua de su vejiga y los mantiene húmedos hasta que hacen eclosión como ranitas. La mayoría de las especies de *Breviceps* son verdaderos habitantes del desierto y viven en regiones áridas del Africa subsahariana; una de ellas, *B. macrops*, habita en las dunas arenosas costeras de la costa atlántica de Sudáfrica, donde no hay agua dulce.

Otras especies experimentan una forma de desarrollo directo muy especializado, denominado viviparismo. En los casos de viviparismo, que significa literalmente parto de crías vivas, los huevos son retenidos en el interior de la hembra, haciendo eclosión en forma de renacuajos avanzados o de ranitas tras un período de incubación que recuerda más al de los mamíferos que al de los anfibios. Aunque, desde el punto de vista energético, es agotador para la hembra, el viviparismo protege a las crías frente a los depredadores terrestres y aumenta mucho las probabilidades de supervivencia.

Sólo se ha comprobado el viviparismo en cinco especies de ranas (cuatro de las cuales pertenecen al mismo género), pero es seguro que el número aumentará a medida que los biólogos vayan conociendo los ciclos biológicos de los anuros tropicales. En tres de ellas (*Eleutherodactylus jasperi*, de Puerto Rico, y *Nectophrynoides tornieri* y *N. viviparus*, de Africa), los renacuajos dependen exclusivamente del vitelo del huevo para su desarrollo, por lo que se las considera ovovivíparas (las crías nacen vivas de los huevos). El verdadero viviparismo, en el que la hembra suministra un suplemento al vitelo con secreciones de su oviducto y pare ranitas acabadas de metamorfosear, sólo se sabe que ocurra en dos especies africanas, *N. liberiensis* y *N. occidentalis*.

El cuidado paterno, es decir, la variedad de comportamientos que exhiben los individuos para proteger a su descendencia, es bien conocido en aves y mamíferos, pero, frente a lo que pudiera esperarse, es también muy común entre las ranas. Como ocurre con otros animales, el cuidado paterno en las ranas corre a cargo de uno o de ambos progenitores. El de algunas especies es rudimentario, como en el caso de la rana peluda africana (así llamada porque los machos desarrollan, en el momento de la reproducción, grandes extensiones piliformes de la epidermis), que se limita a sentarse sobre sus puestas de huevos en el agua, pero, al hacerlo, los protege de depredadores acuáticos, larvas de insectos y peces. En otros, el cuidado paterno es más costoso desde el punto de vista energético; es el caso del pequeño sapo africano *Nectophryne afra*, cuyo ma-





3. NIDO DE ESPUMA de la rana arbórea gris, del género *Chiromantis*, visible bajo las dos parejas en cópula de la fotografía de la izquierda. La espuma sirve para proteger a los huevos. En un estadio posterior, puede verse a los renacuajos cayendo desde el nido de espuma al agua situada debajo (*arriba*). Las fotografías fueron tomadas en Sudáfrica.

cho permanece junto a los huevos durante todo su desarrollo, removiendo el agua con sus patas para que aumente el flujo de oxígeno a través de las membranas. Entre las ranas más especializadas, el cuidado va desde la retención de las crías antes de su salida del huevo (como en las especies vivíparas) hasta su transporte, alimentación e incubación después de producida la eclosión.

Los machos actúan como guardianes de las crías en algunas especies; en otras, lo hacen las hembras. Hay sólo unas pocas de las que se sepa que los dos sexos cooperan como proveedores de sus hijos. Peter Weygoldt, de la Universidad Albert-Ludwigs, en Alemania, estudió una población de laboratorio cautiva y describió una forma de cooperación de lo más insólita entre machos y hembras de *Dendrobates pumilio*, una ranita de los dardos envenenados de Costa Rica. En esta especie, los dos sexos se reparten los deberes paternos: los machos guardan los huevos durante los primeros 10 a 12 días, hasta que eclosionan; a partir de entonces son las hembras las que asumen el cuidado de las crías. Empiezan por transportar cada renacuajo recién salido del huevo a una bromeliácea, en cuya base se haya formado una pequeña charca de agua. Queda así protegido de la desecación y la depredación, pero no tiene aporte alimentario y, por ello, depende por entero de su madre para la nutrición durante el período de seis a ocho semanas requerido hasta la metamorfosis. La hembra cubre las necesidades de sus crías volviendo periódicamente a cada bromeliácea para depositar un huevo no fecundado, lo que proporciona al renacuajo proteínas y carbohidratos esenciales [véase "Ranas venenosas", de Charles W. Myers y John W. Daly; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1983].

Abastecimientos progresivos semejantes se han observado luego en otras ranas de los dardos envenenados, en el laboratorio y en el campo, y también en la gran rana arborícola jamaicana *Osteopilus brunneus* que, como *Dendrobates*, deposita sus huevos en bromeliáceas. Las ranas de las hojas (así llamadas porque muchas especies embuten sus huevos en hojas) han desarrollado una estrategia muy distinta. Al tiempo que depositan los huevos, ponen también muchas cáp-



4. INCUBACION BUCAL por el macho adulto; es parte de la estrategia reproductora de la rana de Darwin, *Rhinoderma darwini*. El macho toma a los renacuajos recién salidos del huevo en la boca; aquéllos se desplazan hasta sus sacos bucales y permanecen allí durante varias semanas hasta completar su desarrollo. Los renacuajos ya desarrollados acaban de salir de la boca de este macho, fotografiado en Chile.

sulas sin huevos, llenas de agua. No tienen valor nutritivo, pero representan un suministro vital de agua, que llega a los huevos por ósmosis.

Hay especies en las que las tareas del cuidado paterno recaen en los machos, quienes defienden agresivamente sus huevos frente a gran variedad de depredadores. Las ranas gladiadoras, nombre que les cuadra perfectamente, se enzarzan con frecuencia en violentas disputas territoriales con otros machos, esgrimiendo espinas parecidas a agujas en la base del pulgar, que sirven para acuchillar la piel y los tímpanos de cualquier intruso. Los machos de esta especie invierten un tiempo y una energía considerables en sus descendientes, primero para la formación de los nidos en los que se pondrán los huevos fecundados y, posteriormente, permaneciendo junto a éstos hasta que hacen eclosión.

Los machos construyen los nidos excavando fango de las riberas adyacentes a ríos de curso lento o a estanques; forman así pequeños cuencos, que se llenan de agua. El lugar resultante, además de estar desprovisto de depredadores, tiene la ventaja de hallarse cerca de una masa de agua permanente. No por ello carece de peligros; los huevos, que se depositan en forma de una delgada película sobre la superficie del agua, son vulnerables al ataque. Cualquier cosa que implique la rotura de la película, por ejemplo, el salto de otra rana o el vuelo de una libélula, hará que los huevos caigan al fondo, donde morirán por falta de oxígeno. En consecuencia, los machos defienden vigorosamente sus huevos y se apresuran a cortar el paso a cualquier intruso.

Hay especies que defienden enérgicamente sus lugares de canto (que pueden incluir otros para la puesta de huevos). Por ejemplo, en Tandayapa, Ecuador, he visto a machos de *Centrolene* entrar en acción cuando se les acercaban machos coespecíficos (de la misma especie). Así enfrentados, intentan expulsarse mutuamente de una hoja favorable situada sobre un riachuelo. Machos de la rana de colmillos australiana, *Adelotus brevis*, se enzarzan asimismo en combates. Provistos de colmillos largos y puntiagudos, que salen de su mandíbula inferior, saltan sobre los intrusos y los muerden.

No todos los machos son tan agresivos. En algunas especies, portan consigo los huevos hasta que hacen eclosión, y así no necesitan defender un lugar de nidificación. Este comportamiento se conoce desde hace más de 200 años, cuando se encontraron machos del sapo partero (*Alytes obstetricans*) con ristras de huevos entrelazadas alrededor de sus patas posteriores. Desde entonces, el transporte de huevos se ha comprobado en, por lo menos, ocho familias de ranas y se ha visto tanto en machos como en hembras. Va desde el simple llevar a cuestas (cuando los huevos o renacuajos se adhieren al dorso del progenitor) hasta la incubación de los huevos (cuando éstos se desarrollan en una bolsa especial, parecida al marsupio de los mamíferos marsupiales).

La incubación de los huevos más común es la de las hembras, pero, en la diminuta ranita australiana de bolsa de cadera, *Assa darlingtoni*, son los machos quienes incuban a las crías. Poco después de salir del huevo, los renacuajos suben serpenteando por las patas de su padre y



5. TRANSPORTE DE LOS RENACUAJOS. Se realiza sobre el dorso de una hembra de ranita de dardos envenenados, *Dendrobates reticulatus*, en la pluviselva amazónica del Perú. Esta hembra acarrea dos renacuajos, uno junto al otro. Una vez los haya transportado hasta el agua (con frecuencia la de una charca temporal), los alimentará con huevos no fertilizados durante unas seis semanas.



6. LAS RANAS MARSUPIALES reciben este nombre por la bolsa que la hembra posee en el dorso. Cuando los huevos son fecundados, el macho los empuja dentro de la bolsa, donde se desarrollan hasta el estadio de renacuajo o de ranita. En la fotografía se muestran, junto a su madre, tres juveniles acabados de nacer, y puede verse a otro que está naciendo de la bolsa materna. Se trata de una rana marsupial de la especie *Gastrotheca ovifera*, fotografiada en Venezuela.

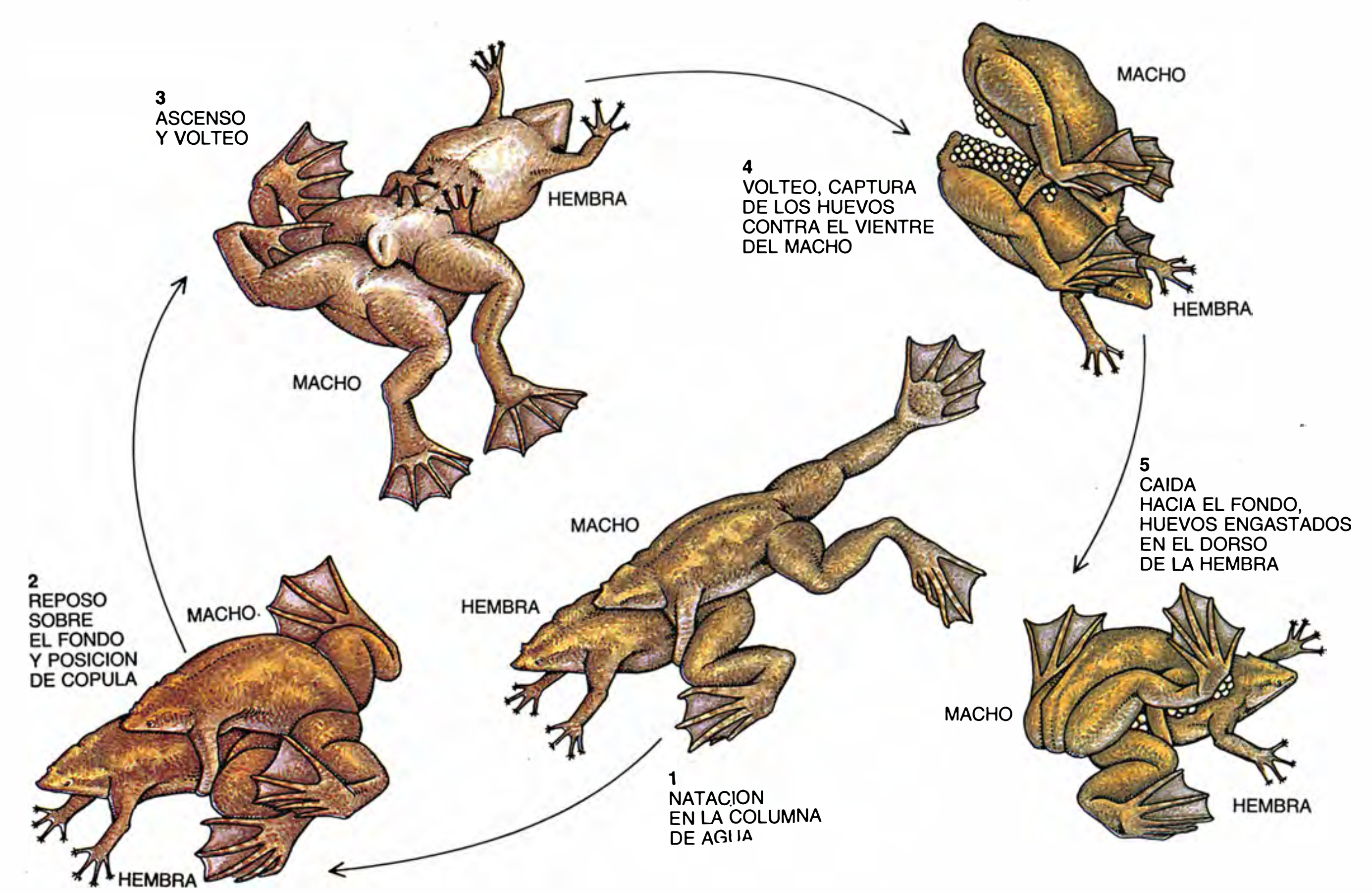
se introducen en unas bolsas laterales especiales, donde continúan su desarrollo. En otras especies, los machos desempeñan un papel facilitador durante la cópula, guiando los huevos hacia la hembra. En la rana sudamericana *Pipa*, por ejemplo, la oviposición está acompañada por una exhibición verdaderamente graciosa de acrobacias subacuáticas: mientras la pareja nada, voltea y gira, el macho esparce por todo el dorso de la hembra los huevos que van emergiendo, que quedan adheridos a la piel. Hay especies en las que, a continuación, la piel se hincha, envolviendo los huevos en una matriz protectora. Después de pasar unos dos meses así engastados en el dorso de la hembra, los renacuajos (o, en algunas especies, las ranitas diminutas) se abren paso a través de la piel para convertirse en ranas de vida libre.

Uno de mis ejemplos favoritos de incubación de huevos se da en las ranas arborícolas sudamericanas de la familia hílidos. Estas ranas incuban sus huevos de una manera análoga a la de los mamíferos y, por ello, se las conoce como ranas marsupiales. La analogía deriva de la presencia de una única bolsa epidérmica en el dorso de la hembra. Conforme los huevos van saliendo y siendo fertilizados, el macho los introduce en la bolsa inmediatamente, empujándolos con los pies a través del dorso de la hembra. Una vez allí, los huevos desarrollan estructuras especiales, parecidas a branquias, que intercambian osmóticamente oxígeno y dióxido de carbono con los tejidos, muy vascularizados, que tapizan la bolsa, lo que permite que los embriones respiren.

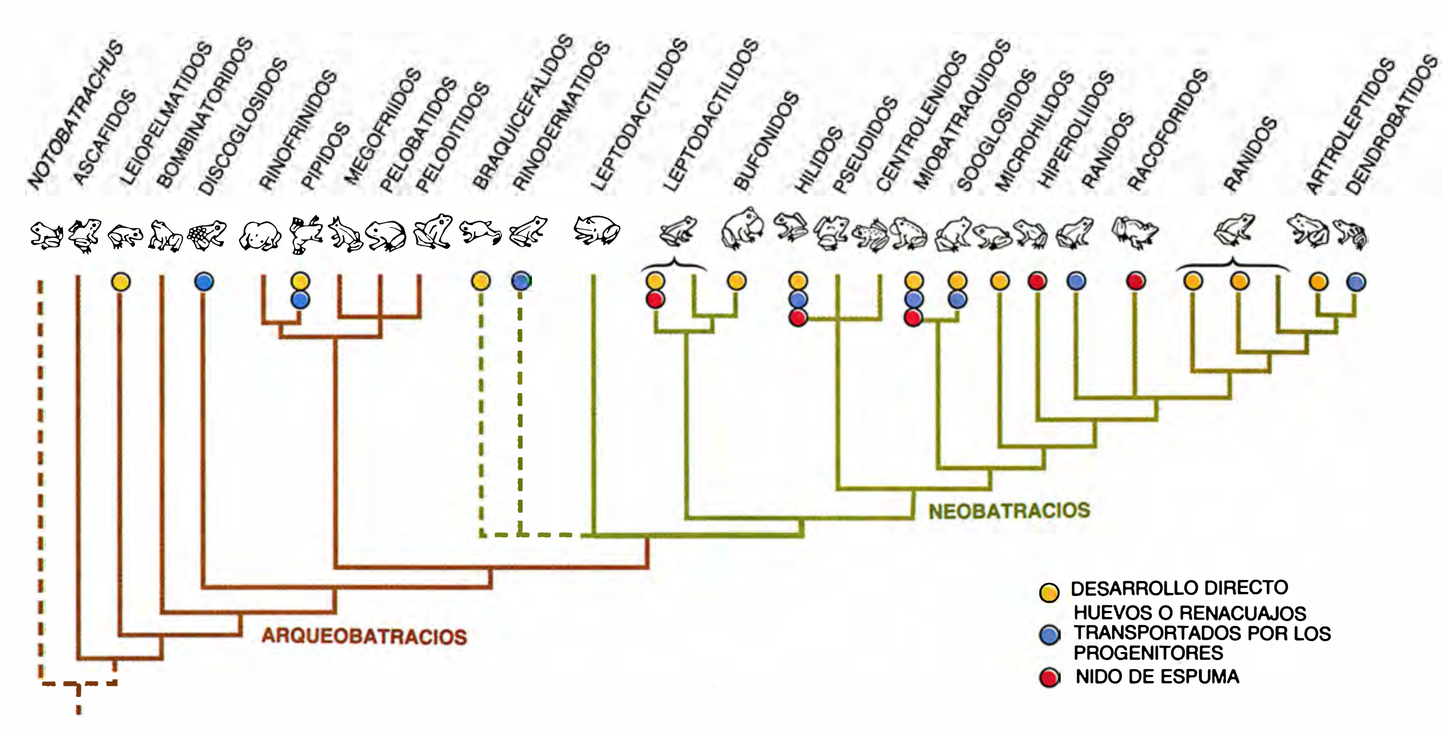
Son muchas las especies de cuyos huevos salen ranitas al eclosionar, que luego caen del dorso de la madre o se arrastran fuera de su bolsa. Pero en algunas especies de *Gastrotheca*, que viven a gran altitud en los Andes, el desarrollo termina en el estadio de renacuajo; la hembra se sienta en estanques someros y libera a sus renacuajos en el agua. El momento en que se produce la eclosión está determinado por la cantidad de vitelo presente en cada huevo, lo que a su vez refleja el número de huevos producidos por puesta. Las especies que liberan pequeños renacuajos producen 100 o más óvulos, de unos dos milímetros de diámetro cada uno. Las especies con desarrollo directo pueden producir solamente unos seis óvulos, pero cada uno de ellos tiene alrededor de 10 milímetros de diámetro [véase "Ranas marsupiales", de Eugenia M. del Pino; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1989].

Mientras que el número de huevos tiende a reflejar el tamaño de la puesta, el período de desarrollo está en función de las condiciones climáticas. Por ejemplo, en los trópicos, las ranas se desarrollan de manera relativamente rápida, sin pasar a veces más de dos o tres semanas en el estadio de renacuajo, mientras que las que viven en climas templados, más frescos, se desarrollan mucho más lentamente. Una de tales especies es la rana manchada, *Rana pretiosa*, que vive en los fríos arroyos que caen en cascada por las Montañas Rocosas. Puesto que el agua fría en la que viven enlentece su metabolismo, se precisa más de un año para producir huevos completamente provistos de vitelo y las hembras los ponen únicamente una vez cada dos o tres años.

Los renacuajos también se metamorfosean lentamente. Las poblaciones de rana toro, *Rana catesbeiana*,



7. SECUENCIA DE APAREAMIENTO de la rana sudamericana *Pipa carvalhoi*. Con el macho montado sobre la hembra, la pareja voltea y gira, y el macho esparce los huevos sobre el dorso de la hembra conforme van saliendo. Allí se adhieren y quedan engastados en un hinchamiento de la piel; dos meses después hacen eclosión como renacuajos o diminutas ranitas.



8. PRINCIPALES FAMILIAS DE RANAS, clasificadas según su estrategia reproductora (*círculos de color*) y sus relaciones filogenéticas (*líneas de color*). Las líneas de trazos representan asociaciones dudosas en el esquema de relaciones de parentesco.

que viven en los Estados Unidos septentrionales y en Canadá, suelen pasar dos años en el estadio de renacuajo; otra especie, *Ascaphus truei*, necesita tres años para alcanzar el estado adulto. Aunque las ranas toro sean enormemente fecundas, pues producen de 10.000 a 20.000 huevos por año, la mortalidad durante el largo período de desarrollo es también muy elevada, pudiendo alcanzar el 99 por ciento.

En los hábitats áridos, el desarrollo no está limitado por la temperatura, sino por la humedad. Las ranas que viven en desiertos, como *Breviceps*, sólo pueden criar una o dos noches al año, cuando llueve fuertemente. Pero, una vez realizada la fecundación, el crecimiento prosigue con rapidez. Los sapos de espuelas del sudoeste de los Estados Unidos, por ejemplo, tienen un estadio de renacuajo que dura menos de dos semanas, ritmo que resulta imprescindible en un hábitat en el que puede que no se disponga de agua más que unas pocas semanas. Las ranas de entornos comparables de otras partes del mundo muestran pautas parecidas.

Por fascinantes que sean tan variadas aproximaciones a los ciclos vitales, no dispondríamos de mucha información científica sobre ellas si no fuera por la buena voluntad de los herpetólogos, que pasan incontables horas observando anuros en el campo, en condiciones naturales. Con frecuencia me preguntan por qué escogí pasar tanto tiempo vagando de noche por las junglas de todo el mundo, en búsqueda de serpientes, ranas y otros vertebrados de sangre fría. La respuesta resulta obvia, según creo, para todo biólogo de campo: el mundo natural ofrece infinidad de motivos de admiración y sorpresa. Mis colegas y yo nunca sabemos, por ejemplo, cuándo va a aparecer de súbito algo excepcional en el haz de nuestros frontales, aunque estemos caminando a lo largo de un sendero que ya hayamos recorrido repetidamente una docena de noches. Quizá demos con una especie que jamás habíamos visto antes; quizá no la haya encontrado nunca nadie.

Uno de los momentos más emocionantes de mi vida tuvo lugar durante una expedición al Chile austral, en 1975. Un día me topé con una rana de Darwin, *Rhinoderma darwinii*, en el mismo instante en que estaba "pariendo". Aunque la rana es pequeña y de aspecto más bien poco llamativo, la evolución la ha dotado de un modo de desarrollo distinto a cualquiera de los descritos. Los machos adultos toman en su boca a los renacuajos recién salidos del huevo y, de allí, las crías migran a los sacos bucales, donde permanecen durante varias semanas hasta que el desarrollo es completo; después salen por la boca del padre.

Sabía que *Rhinoderma* tenía este comportamiento, pero el hecho de poder verlo con mis propios ojos me produjo un entusiasmo difícil de describir. Tras presenciar la procesión de ranitas que salían de la boca de su padre, envié a toda prisa una carta a Michael J. Tyler, un colega y amigo, herpetólogo entusiasta de la Universidad de Adelaide, en Australia. Pueden imaginarse mi desilusión cuando, pocas semanas después, recibí una respuesta que reducía a la nada mi breve notificación. Tyler y sus colegas C. J. Corben y G. J. Ingram acababan de observar una forma previamente desconocida, pero aún más extraña, de cuidado paterno en una rana australiana, *Rheobatrachus silus*. En esta especie, son las hembras las que se tragan los huevos después de su fecundación y luego los incuban en el estómago. El envío consistía simplemente en una fotocopia del artículo que detallaba el descubrimiento, con la nota: "*Touché*! Mike". Mi observación quedaba eclipsada.

La incubación gástrica, nombre que recibe el fenómeno, es uno de los ejemplos más extraños conocidos de reproducción animal. Acabé por observar estas ranas por mí mismo en 1979, mientras visitaba Queensland del sur, y puedo decir que verdaderamente *Rheobatrachus* ha desarrollado un modo de reproducción distinto al de cualquier otra rana. ¿Quién iba a creer que los renacuajos pudieran pasar seis semanas en el estómago de su madre sin ser digeridos? ¿Cómo es esto posible?

Para empezar, las hembras que crían dejan de alimentarse durante el período reproductor. Tyler y sus colegas han demostrado que la producción de ácido clorhídrico y de pepsina en el estómago es interrumpida por la prostaglandina E_2; esta sustancia, similar a una hormona, la segregan primero las cápsulas ovígeras y después los propios renacuajos. Interrumpido de este modo su funcionamiento normal, el estómago se transforma de órgano digestivo en un saco de gestación protector.

Los huevos, cuyo número oscila entre 21 y 26, son relativamente grandes (unos cinco milímetros de diámetro) y, por lo tanto, ricos en vitelo. Esto hace que los renacuajos no precisen de suministro externo de alimento, nutriéndose exclusivamente de vitelo a lo largo de las seis semanas que dura el desarrollo. Al producirse el nacimiento, el esófago de la hembra se dilata de manera que recuerda el paso de una cría de mamífero por el canal vaginal, y las jóvenes ranitas son expulsadas de la boca de la madre. Pocos días después, el estómago empieza a funcionar de nuevo como órgano digestivo y la rana vuelve a comer.

En 1984 se encontró una segunda especie de incubador gástrico, *Rheobatrachus vitellinus*, bastante más al norte de Queensland. Por desgracia, búsquedas intensas y sistemáticas realizadas durante los últimos años no han conseguido dar con individuos de ninguna de ambas especies, lo que nos hace pensar a mis colegas y a mí que en la actualidad se hallan extintas. Esta pérdida es especialmente lamentable porque estudios preliminares realizados por Tyler y sus socios sugieren que extractos de esta prostaglandina pudieran haber sido eficaces para el tratamiento de las úlceras estomacales humanas.

Tras el descubrimiento de la incubación gástrica y de la alimentación de los renacuajos, ya no hay nada que me sorprenda. Pero, ¿por qué razón muestran las ranas esta plasticidad reproductora cuando otros vertebrados no lo hacen? Todas las aves ponen huevos con cascarón y casi todos los mamíferos paren crías vivas, que después son amamantadas por la hembra. Las ranas se ajustan a pocos estereotipos, si es que lo hacen a alguno. Además, es evidente que sus tácticas reproductoras no son el resultado de simple mutación, sino el estadio final de complejas interacciones fisiológicas, morfológicas y etológicas.

El hecho de que algunos miembros de los tres grupos de anfibios (las cecilias o ápodos, las salamandras o urodelos y las ranas o anuros), así como los peces, depositen sus huevos en el agua sugiere que la oviposición acuática es un rasgo primitivo o generalizado. Por lo tanto, las otras estrategias, que se han desarrollado de manera independiente en muchas estirpes de ranas, pueden considerarse como evolutivamente derivadas. Una conclusión es cierta: las ranas, que parecen poco adecuadas para una existencia terrestre, se han adaptado de maneras extraordinarias a la vida en tierra y, al hacerlo, han conseguido colonizar gran parte del planeta.

¿No resulta entonces irónico y en extremo desafortunado que las ranas, que han radiado evolutivamente con tanto éxito, estén experimentando en la actualidad la extinción a unas tasas sin precedentes, víctimas de la incapacidad humana para preservar el mundo natural? Sólo en los últimos cinco años se ha perdido un número incalculable de especies, en muchos casos por destrucción de su hábitat. Cierto es que no se comprenden bien las causas de la reducción y la extinción de los anuros, pero varios biólogos (entre los que me cuento) creemos que los efectos acumulados de la contaminación del aire y del agua, de la lluvia ácida y del aumento de radiación producido por la pérdida de ozono estratosférico están cobrando su diezmo. Por desgracia, la pérdida de tantas especies no sólo afecta a la estabilidad global de los ecosistemas, sino que pone punto final a linajes evolutivos que han sobrevivido durante millones de años. La magnitud de tal pérdida es inconmensurable. Nuestra única esperanza es que los pueblos y sus gobiernos reconozcan las consecuencias de la extinción biológica y tomen medidas para evitarla antes de que haya desaparecido una parte demasiado importante de nuestro patrimonio genético.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOLOGY OF AMPHIBIANS. William E. Duellman y Linda Trueb. McGraw-Hill, 1986.

ALTERNATIVE LIFE-HISTORY STYLES IN ANURAN AMPHIBIANS: EVOLUTIONARY AND ECOLOGICAL IMPLICATIONS. William E. Duellman en *Alternative Life History Styles of Animals*. Dirigido por Michael N. Bruton. Kluwer, 1989.

GUILDS OF ANURAN LARVAE: RELATIONSHIPS AMONG DEVELOPMENTAL MODES, MORPHOLOGIES, AND HABITATS. Ronald Altig y Gail F. Johnston en *Herpetological Monographs*, n.º 3, págs. 81-109, 22 de junio de 1989.

Las bases de la teoría económica

La modelización de la economía es difícil. El recurso intensivo a las matemáticas no ha dado en economía los resultados esperados y los modelos se alejan cada vez más del mundo real

Bernard Guerrien

La economía proclama su carácter científico: la antigua denominación de "economía política" ha sido reemplazada por la de "ciencia económica". ¿Está justificado este cambio? Para juzgarlo, analizaremos el proyecto y la evolución de la corriente dominante, la llamada neoclásica. Según ella, la teoría económica sólo puede acceder al nivel científico pagando el precio de una formalización matemática de la producción y de los intercambios. Busca el origen de los fenómenos económicos y sociales en los comportamientos individuales (individualismo metodológico), que intenta aprehender tomando como ejemplo la forma en que físicos, químicos y biólogos describen los fenómenos naturales basados en modelos de comportamiento de átomos, partículas elementales, moléculas, células y genes. ¿Cómo caracterizar estos átomos de la economía que son los individuos o las empresas? ¿Qué tipos de relaciones se establecen entre ellos? ¿Podemos derivar leyes de sus comportamientos?

Examinaremos cómo responden los economistas neoclásicos a estas preguntas, empezando por el modelo de competencia perfecta, punto de partida y referencia constante de sus análisis.

El modelo de competencia perfecta

Los economistas neoclásicos han buscado un conjunto de hipótesis no contradictorias de las cuales puedan sacarse conclusiones por deducción. Así, su modelo de competencia perfecta estipula la existencia de individuos libres e independientes, movidos por un principio de racionalidad en un marco institucional determinado. Los individuos, o "agentes", que constituyen las unidades elementales del modelo son los consumidores (familias) y los productores (empresas).

Los primeros quedan caracterizados por una función matemática, la función de utilidad, que es un indicador de la satisfacción proporcionada por cada uno de los consumos a su alcance, lo que permite clasificarlos según un orden de preferencia; así, en un modelo con sólo dos bienes, la utilidad de los bienes B_1 y B_2, para un individuo dado, podría definirse como el producto de la cantidad q_1 de B_1, elevada a la potencia 1/2, por la cantidad q_2 de B_2 a la potencia 1/3. Toda familia dispone de una dotación inicial de bienes o de derechos de propiedad, y no es misión del economista ocuparse del origen de este reparto *a priori* de los recursos de la sociedad.

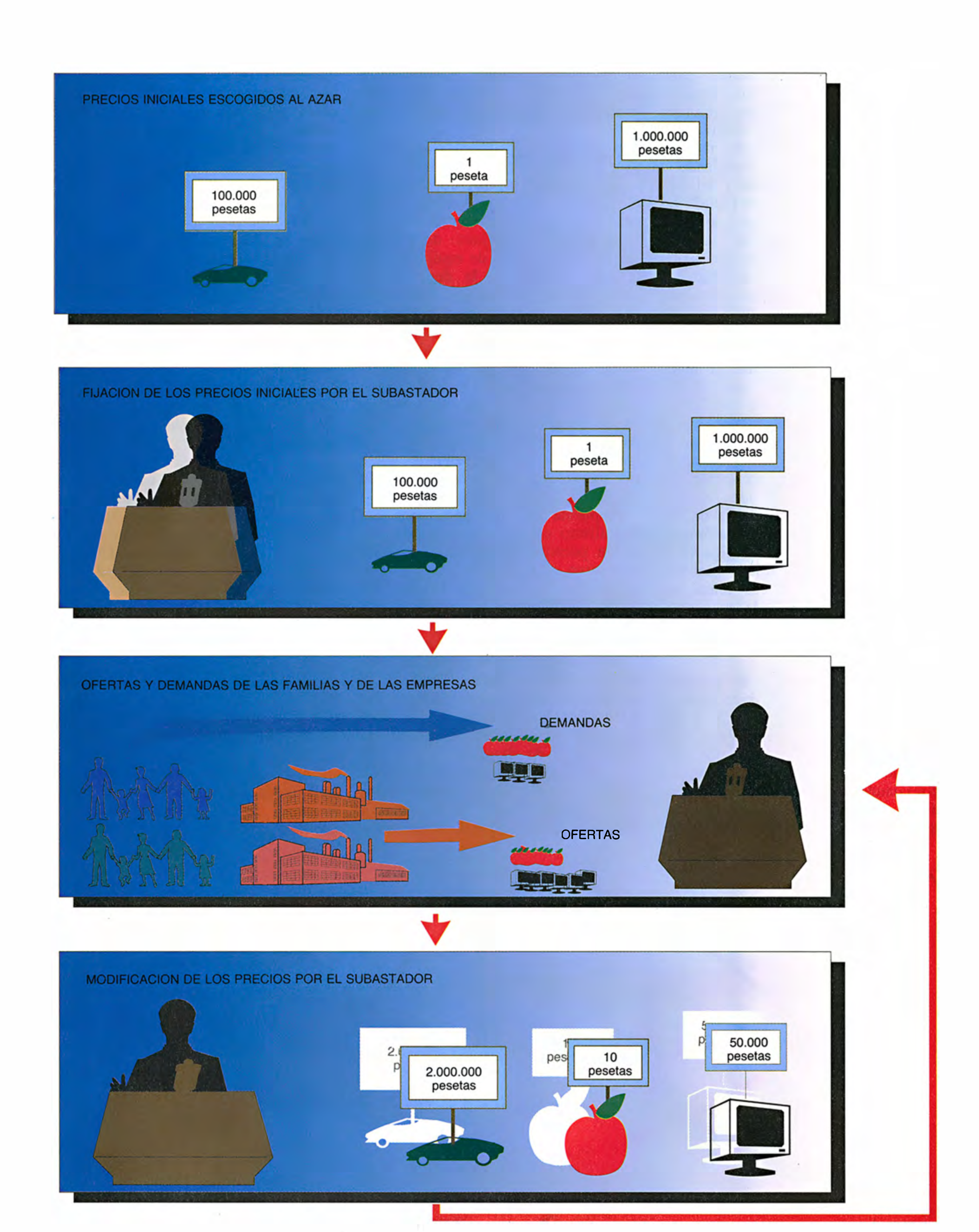
De la misma forma, los productores están caracterizados por la función de producción, que asocia a todo conjunto de materias primas, entre las que se incluyen el trabajo y las máquinas, la cantidad máxima de productos que con él puedan obtenerse. Por ejemplo, podría representarse una panadería mediante una función que diese la cantidad (máxima) de pan conseguible con x kilogramos de harina, y dosis de levadura, z kilowatt-hora de energía, etc.

Los agentes económicos actúan según el principio de racionalidad: cada consumidor optimiza su satisfacción dentro de los límites de sus recursos (su dotación inicial), y cada empresa busca el beneficio máximo. Estas optimizaciones se efectúan dentro de un marco institucional preciso, que determina en parte el comportamiento de individuos y empresas. El marco institucional considerado por el modelo de competencia perfecta supone la existencia de un sistema de precios fijos, conocidos y aceptados por todos, a partir del cual las familias y las empresas hacen sus ofertas y demandas conforme al principio de racionalidad.

El funcionamiento del modelo es iterativo: tomando como punto de partida unos precios iniciales fijados al azar, familias y empresas hacen sus ofertas y demandas respectivas, tras de lo cual un "subastador" calcula nuevos precios, que armonicen las ofertas y las demandas, y los fija; familias y empresas responden a esta nueva situación con nuevas demandas y ofertas, y el ciclo se repite indefinidamente.

No deja de resultar soprendente encontrar un esquema tan centralizado en un modelo de "economía de mercado". Tampoco el subastador está libre de sospecha: es el individuo u organismo que fija los precios y recoge las ofertas y demandas, pero ¿cuáles son sus motivaciones y cómo influyen en su actuación? ¿Qué es lo que optimiza? A los neoclásicos no les gusta demasiado entretenerse en estas cuestiones esenciales... e insolubles.

Por añadidura, los comportamientos de los individuos en competencia perfecta son ingenuos: cada uno establece sus planes (sus ofertas o sus demandas) sin tener en cuenta más que los precios fijados. No se preocupa de lo que harán los otros individuos ni pretende anticiparse a las variaciones de precios; nadie persigue la formación de coaliciones o grupos de presión y se excluye cualquier tipo de comportamiento especulativo. En efecto, se supone que el tasador fija los precios de los bienes futuros de la misma forma que los de los bienes presentes (dicho de otra manera, gestiona los mercados a plazo para los bienes futuros); las familias y las empresas realizan elecciones intertemporales, es decir, para todo "el período de vida" de la eco-



1. EL MODELO DE COMPETENCIA PERFECTA considera que las interacciones entre consumidores y productores están gestionadas por un "subastador", que recoge las demandas y las ofertas y fija los precios. A partir de precios iniciales propuestos al azar, los modifica en función de las ofertas y de las demandas (aumentándolos cuando la demanda es superior a la oferta y reduciéndolos en caso contrario); recoge nuevas ofertas y demandas, y así sucesivamente. En 1954, Kenneth Arrow y Gérard Debreu demostraron la existencia de un equilibrio competitivo, es decir, de un conjunto de precios fijados que permite igualar las ofertas con las demandas de todos los bienes. Este equilibrio puede resultar inalcanzable en la práctica.

nomía: cuando el subastador hace variar los precios, modifica simultáneamente los de los bienes presentes y futuros. Tal elección equivale a eliminar la incertidumbre del modelo y reforzar su carácter centralizado.

¿Son realistas las hipótesis del modelo de competencia perfecta? La pregunta parece inútil: todos los economistas admiten que un modelo como éste es una construcción artificial, muy alejada de la realidad; no obstante, los neoclásicos presentan dos tipos de justificación que no siempre son compatibles.

Para unos, hay que actuar "como si" el modelo representase la realidad de forma aceptable, aun sabiendo que sus hipótesis son manifiestamente falsas, porque no se busca tanto la coherencia lógica como la obtención de predicciones susceptibles de comprobación experimental. Quienes sostienen tal idea suelen comparar su actividad con la de los físicos de la materia subatómica. Pero los últimos se ven obligados a actuar así debido al carácter inobservable de algunos de sus temas de estudio, lo que no sucede en economía; además, ningún físico se conformaría con una hipótesis que supiera inverosímil.

De hecho, la mayoría de los neoclásicos considera más bien que el modelo de competencia perfecta no es más que una primera etapa, una representación idealizada de los mecanismos de mercado. Su objetivo es ir relajando progresivamente las principales hipótesis de forma que se llegue a una visión más precisa de la realidad económica. Retomaremos esta posibilidad después de haber examinado los resultados del modelo.

El equilibrio competitivo

Los neoclásicos han construido el modelo de competencia perfecta para demostrar matemáticamente que existe al menos un conjunto de precios, los llamados precios de equilibrio, que igualan la oferta y la demanda de cada uno de los bienes contemplados; estos precios corresponderían a una situación económica "óptima", en la que, teniendo en cuenta el reparto inicial de los derechos de propiedad, cada agente obtendría la satisfacción o el beneficio máximos. La interpretación usual de este resultado es la de que un sistema de mercados perfecto, donde la competencia actúe sin trabas, conduce a una situación que es la "mejor" para todos.

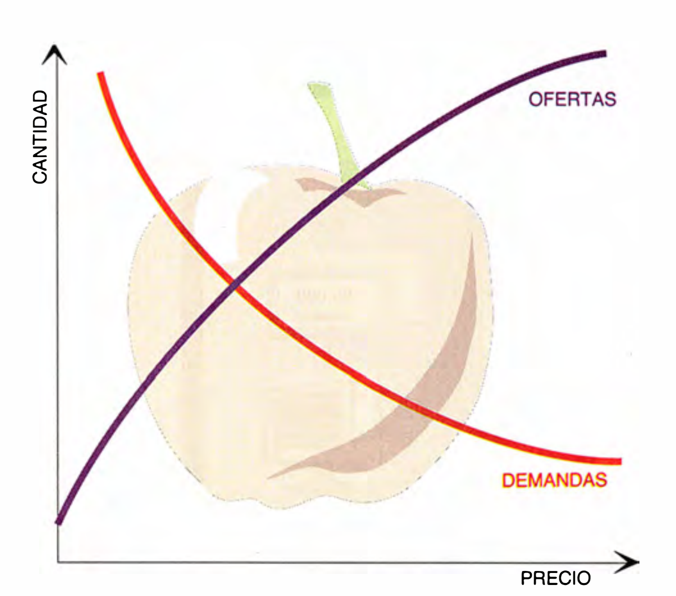
Propuesta por los partidarios del liberalismo económico, esta interpretación permite desempeñar un papel normativo a la competencia perfecta: puesto que supone unos estados óptimos, constituye una referencia, una norma, hacia la cual hay que tender, aunque no se pueda alcanzarla.

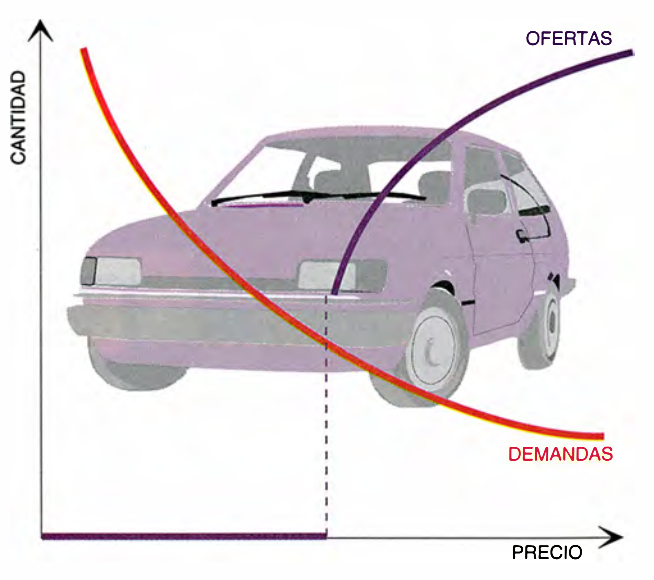
La existencia de al menos un conjunto de precios de equilibrio en el modelo de competencia perfecta fue establecida a principios de los años cincuenta por Kenneth Arrow, de la Universidad de Stanford, y por Gérard Debreu, en Berkeley (ambos fueron posteriormente galardonados con el premio Nobel de economía), gracias a unas hipótesis suplementarias relativas al tipo matemático de las funciones de utilidad o de producción (funciones continuas o derivables). La demostración de la existencia de precios de equilibrio era una hazaña, pues, si bien fundada en hipótesis discutibles, evitaba el recurso a especificaciones particulares de las funciones (en vez de considerar funciones concretas, como la de utilidad explicada anteriormente, K. Arrow y G. Debreu examinaron familias de funciones, descritas por fórmulas que contienen parámetros).

No obstante, la previsión de la existencia de al menos un equilibrio no responde más que en parte a las preguntas inicialmente planteadas: el equilibrio sólo tiene interés si puede alcanzarse gracias a la evolución del sistema, es decir, si es estable. El fondo de una taza es un equilibrio estable; un trozo de azúcar que se suelte en la taza llegará inexorablemente a él por la acción de la gravedad; al contrario, la cima de una montaña es un punto de equilibrio inestable.

Ahora bien, en competencia perfecta, el mecanismo de ajuste utilizado es el del sondeo: el subastador anuncia al azar un conjunto de precios iniciales y luego los hace variar según el principio de la oferta y la demanda, aumentando los de aquellos bienes cuya demanda sea superior a la oferta y reduciendo los de los bienes poco demandados. ¿Alcanza así los precios de equilibrio?

Como es lógico, a finales de los años cincuenta los economistas matemáticos de más reputación estudiaron este problema. Pronto se encon-



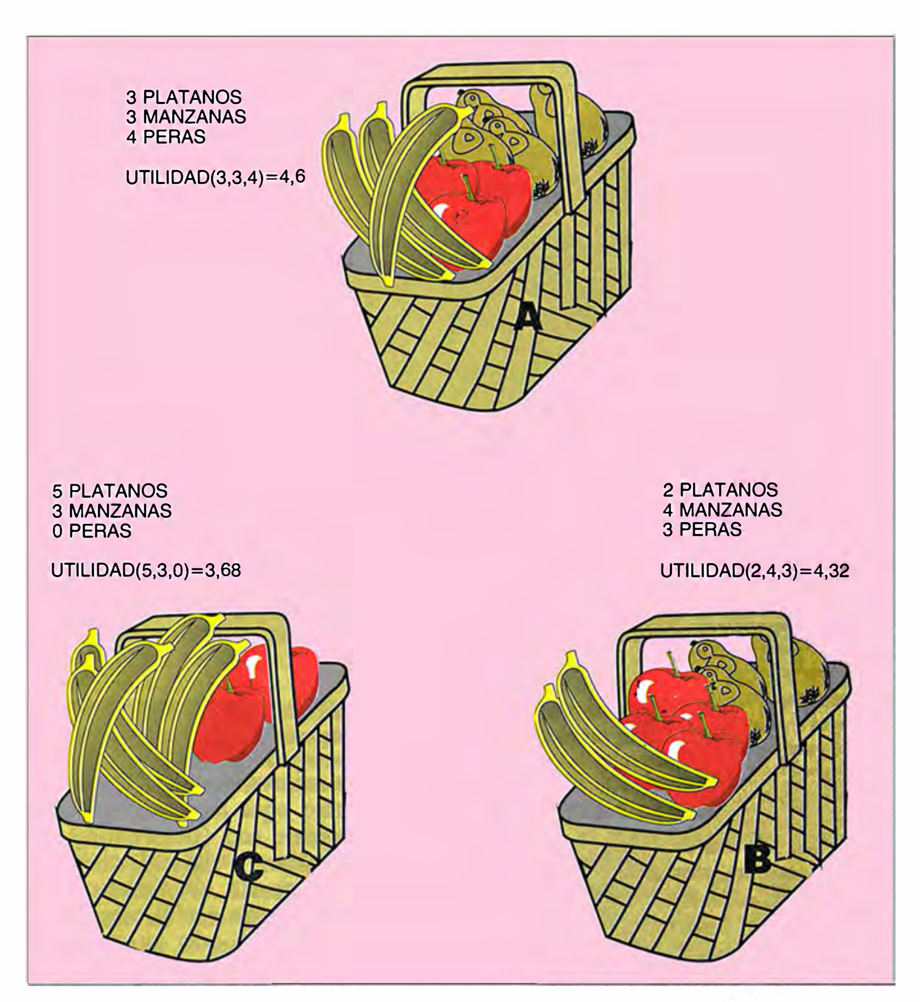


2. PARA QUE EXISTA UN EQUILIBRIO COMPETITIVO es necesario que las curvas de oferta y de demanda de las familias se corten (su intersección representa el equilibrio). Así sucederá si ambas curvas son continuas (*izquierda*), pero no existe ninguna razón para que esto sea siempre cierto: es perfectamente posible que un individuo decida comprar champaña si su precio es menor de 2000 pesetas y vino en caso contrario. Del mismo modo, una empresa que fabrique coches (*derecha*) no puede venderlos por debajo de un precio mínimo, pues si no perdería dinero al no cubrirse los costes fijos.

traron con dificultades inesperadas: modelos relativamente reducidos, formados con pocos individuos y unos cuantos bienes, eran inestables; su simulación por ordenador mostraba comportamientos cíclicos o caóticos. Esta inestabilidad fue confirmada mediados los años setenta, cuando se demostró matemáticamente que la ley de la oferta y la demada no conduce generalmente a un equilibrio; éste existe, pero no necesariamente se alcanza.

Tal resultado es sorprendente. ¿No parecen estar en equilibrio las economías de mercado, que se suponen regidas por esta ley? Sin duda, pero no olvidemos que el modelo de competencia perfecta es un modelo abstracto, ideal, semejante a un sistema mecánico sin roces. Si la realidad no es tal y como la prevé el modelo, es porque intervienen otros mecanismos (reglas, convenios, actuaciones del Estado o de los sindicatos) que desempeñan el papel de amortiguadores y limitan ciertas evoluciones. Por paradójico que resulte, las "imperfecciones" del sistema económico son esenciales para su viabilidad.

El resultado de inestabilidad, que desautoriza el mensaje liberal, no es sino la consecuencia de otro resultado general: no es posible deducir "leyes" del modelo, habida cuenta de la complejidad de las interacciones individuales. Si se modifican sus parámetros —por ejemplo, las dotaciones iniciales—, pueden generarse funciones de oferta y demanda muy diferentes; ahora bien, estos parámetros son datos *a priori*, escogidos arbitrariamente por el modelizador. Los partidarios del "como si", que se basaban en el poder predictivo del modelo, se encuentran en un callejón sin salida y los defensores del relajamiento progresivo de las hipótesis, en un aprieto: si el caso ideal es tan decepcionante, ¿qué se puede esperar de hipótesis aún menos restrictivas? Se conoce la respuesta: ya no existe necesariamente un equilibrio y se ha perdido la "optimalidad" descrita anteriormente; el modelo ya no puede utilizarse con fines normativos.



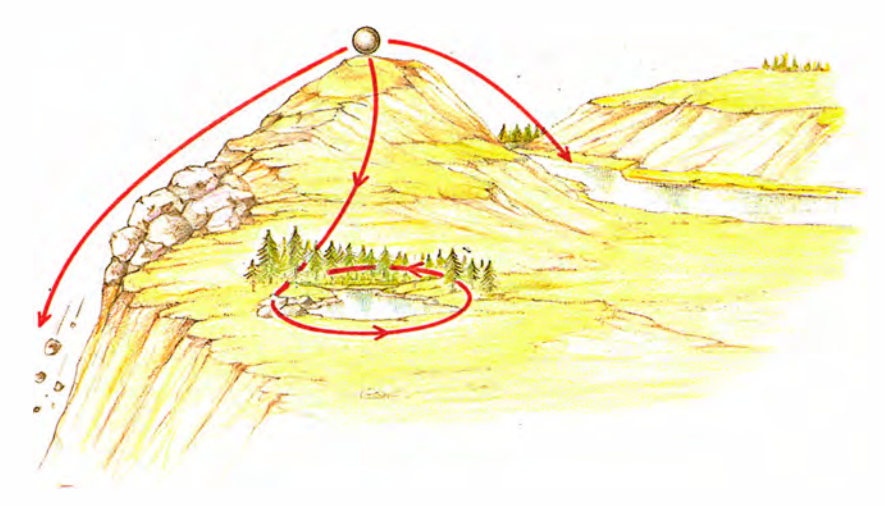
3. LAS ELECCIONES de las familias se refieren a "cestas de bienes", es decir, a grupos de bienes caracterizados por la satisfacción global que procuran. La satisfacción viene descrita analíticamente por una función. Así, en el ejemplo que representa esta figura, la utilidad de una cesta es igual a la suma de los resultados de elevar el número de bienes de cada tipo que contiene a las potencias 1/2, 1/3 y 1/4, para los plátanos, las manzanas y las peras, respectivamente. La función permite una clasificación transitiva: la cesta A es preferida a la B, que, a su vez, se prefiere a la C; en consecuencia, la cesta A es preferida a la cesta C. Esta condición es necesaria para establecer un modelo coherente, pero no siempre se cumple en la realidad: se podría preferir la cesta A a la B, la B a la C y la C a la A.

Una huida hacia adelante

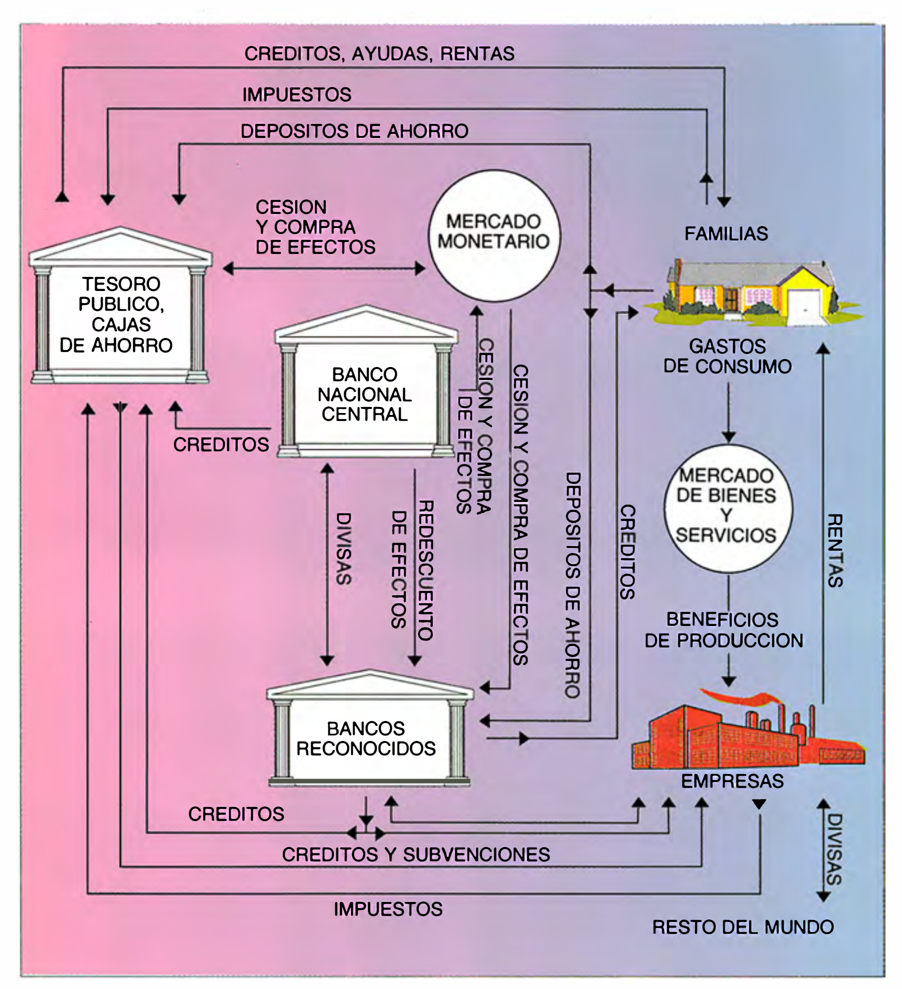
El callejón sin salida en que se encuentran los partidarios del modelo de competencia perfecta no ha puesto fin al programa de investigación neoclásico, ni siquiera ha suscitado un revisión fundamental de sus principios. Pocos son los que saben y dan a conocer cómo va exactamente este programa. La mayoría de los investigadores neoclásicos evita la complejidad de las presentaciones de equilibrio general, en el que todos los individuos interactuarían sobre el conjunto de mercados, y suelen limitarse a razonamientos de equilibrio parcial, que considera mercados de bienes "aislados" (así el de un bien determinado, como el bogavante, en un lugar concreto, Zamora, por ejemplo). Aunque esta aproximación parcial simplifica considerablemente la presentación, no está exenta de contradicciones lógicas.

En efecto, debido a las incidencias sobre las rentas y a la intercambiabilidad más o menos grande de los bienes, toda variación de precios y de cantidades en un mercado tiene repercusiones inevitables sobre los otros mercados: si el precio del bogavante baja, los ingresos de los pescadores bajan; por tanto, comprarán menos verduras, lo que reducirá los ingresos de los comerciantes de verduras, que comprarán menos bogavante, a menos que sustituyan sus compras de filete de buey por bogavante, lo que, a su vez, repercutirá sobre el precio de la carne y sobre los ingresos de los carniceros, etc. Los efectos inducidos, que pueden resultar despreciables para bienes secundarios, de interés limitado, se hacen preponderantes en el caso de mercancías económicamente importantes, como el trabajo. Además, como el enfoque de equilibrio parcial no tiene en cuenta todas las consecuencias de las decisiones económicas, no permite conclusiones normativas, aunque no se priven de ellas la mayoría de los economistas que lo adoptan.

En resumidas cuentas, los neoclásicos consideran el estudio de los



4. **EL EQUILIBRIO COMPETITIVO, aunque exista, puede que no se alcance nunca. Los precios fijados por el subastador pueden compararse a una canica moviéndose por un paisaje accidentado. Los equilibrios son de dos tipos: los hay estables, como los fondos de los valles; otros son inestables y corresponderían a la cima de las colinas. Pero, aun cuando exista un equilibrio económico estable, puede que no se alcance jamás, si las condiciones iniciales llevan a una evolución sin fin de tipo caótico o cíclico.**



5. **LA MACROECONOMIA considera unos descriptores económicos macroscópicos, llamados agregados, como son los créditos, los impuestos, los gastos de consumo, etc. Se basa en información aportada por la contabilidad nacional, sobre todo, y está en el origen de los modelos que sirven para establecer las previsiones y para tratar de justificar las políticas económicas emprendidas por el Estado. Estudia la evolución de las relaciones entre los agregados utilizando un principio sencillo: las cuentas deben estar equilibradas. Así, en el modelo aquí representado, referido a la interacción del circuito monetario con el de bienes y servicios, los gastos de las familias (incluido el ahorro) son iguales a sus rentas. El papel del Estado es explícito, cosa que no sucede en el modelo de competencia perfecta.**

equilibrios parciales como una forma de salir del paso; quienes lo utilizan suelen hacerlo a pesar suyo, ya sea porque confíen en ir incorporando en el futuro todos los efectos indirectos que omiten hoy (esperanza infundada, como hemos visto, ya que todo resultado parcial desaparece en la vorágine de las interdependencias), sea porque consideren que hay que simplificar para sacar conclusiones. De hecho, los partidarios del individualismo metodológico y de la matematización absoluta de la teoría económica prefieren replegarse sobre "pequeños modelos" que, según ellos, respetan la norma de la "cientificidad". La justificación de este paso suele fundarse en las necesidades de la macroeconomía.

Macroeconomía, pequeños modelos y parábolas

La macroeconomía constituye un enfoque más global que el precedente y centra su interés en la evolución y las relaciones entre descriptores globales de la economía de un país, llamados agregados, como son el producto o renta nacional, la masa monetaria y el nivel de los precios. Se basa en la información aportada, sobre todo, por la contabilidad nacional y sirve a su vez de fundamento para los modelos que permiten establecer previsiones y, en la medida de lo posible, justificar las políticas económicas emprendidas por el Estado.

La sensibilidad de estos modelos a las hipótesis (del tipo de ¿debemos considerar que los depósitos de ahorro forman parte de la masa monetaria?) origina grandes disparidades de resultados, motivadoras de la cacofonía que el público percibe en el discurso de los economistas. Para mitigar esta sensibilidad, la corriente neoclásica propone, como siempre, adoptar un método riguroso y limitarse a buscar en el comportamiento racional (maximizador) de los individuos las explicaciones a los fenómenos económicos. No obstante, confundir individuos y agregados (para aplicar el principio de maximización a estos últimos) no es lógica ni empíricamente posible. Es una dificultad muy parecida a la que presenta un gas: presión y temperatura son descriptores macroscópicos de una muestra de gas (como los agregados en el caso de los agentes económicos); pero resulta obvio que un átomo, concebido como una esfera dura descrita por una posición y una velocidad, no puede asimilarse a una muestra macroscópica de gas.

Por lo demás, los neoclásicos no

pueden deducir leyes económicas de su modelo cuando el número de agentes es elevado: la complejidad de las interacciones llega a ser del mismo orden que la del mundo económico real; la única salida es la reducción drástica del número de bienes y de individuos considerados, la construcción de "pequeños modelos".

Como éstos excluyen la diversidad de los objetos estudiados, se pone el acento sobre el marco institucional retenido: presencia o ausencia de mercados para todos los bienes futuros, condiciones de existencia de una moneda, anticipaciones y comportamientos estratégicos, etc. Así se relajan las hipótesis de base del modelo de competencia perfecta, pero a un alto precio: la pérdida de toda generalidad, la elección —arbitraria— de hipótesis particulares, que condicionan de forma decisiva los resultados, con lo que reaparece el problema que los neoclásicos querían evitar.

Desde luego, los instrumentos matemáticos utilizados son impresionantes: topología diferencial, procesos estocásticos, teoría del caos... Es el virtuosismo de la técnica; hasta hay quienes se escudan tras el carácter lúdico de sus estudios, cuyas naturaleza teórica y finalidad permanecen de lo más vago. A veces, los pequeños modelos se denominan parábolas; lo esencial son las opciones personales de los investigadores, lo que quieren probar: la economía política recupera todos sus derechos.

La naturaleza de parábola de estos modelos se ve confirmada por la repugnancia de sus promotores a confrontarlos con la realidad. Un estudio reciente de David Colander, de la Universidad de Iowa, y de Arjo Klamer, del College Middlebury, muestra que los economistas son, de entre todos los investigadores de todas las disciplinas, quienes publican la proporción más grande de artículos carentes de cualquier verificación experimental, directa o indirecta. La importancia que actualmente tiene el número de publicaciones de un investigador para su avance en el seno de la Universidad tiende, desde luego, a mantener y reforzar esta tendencia.

El principio de racionalidad y la utilidad de la economía

Antes de examinar otras teorías "heterodoxas", volvamos al principio de racionalidad, que está en el corazón de la teoría neoclásica. Su aplicación plantea problemas tan pronto como se sale del marco de la competencia perfecta, en el que la racionalidad adopta una forma simple y hasta ingenua (ausencia de especulación, aceptación pasiva de las reglas impuestas por el subastador y del reparto inicial de los recursos). A poco que modifiquemos el contexto institucional (por ejemplo, si el subastador autorizase intercambios fuera del equilibrio) o tengamos en cuenta la incertidumbre que rodea la toma de decisiones económicas reales (cada agente no conoce todos los precios futuros, por ejemplo), las irreversibilidades, el coste de la recogida y tratamiento de la información, se vuelve difícil el dar una forma precisa al comportamiento racional. De hecho, cualquier comportamiento puede ser considerado racional con las hipótesis adecuadas.

Observemos, para terminar, que el resultado de comportamientos racionales puede ser irracional si no existe competencia perfecta ni cooperación: otras situaciones, diferentes de las alcanzadas, son mejores para todos; una de las aportaciones de la teoría de los juegos es haber llamado la atención sobre este punto (siempre bajo forma de parábola). Así, para un conductor aislado, es más racional conducir por en medio de la carretera, pero la solución "colectivamente" racional consiste en conducir siempre por el mismo lado. Este resultado negativo es una piedra más arrojada a la charca neoclásica.

Este sombrío cuadro sólo atañe a la corriente dominante, que tiene la exorbitante pretensión de querer dar una visión de las relaciones sociales esencialmente matemática. Incluso con un modelo tan simplificado como es el de competencia perfecta, no se llega a ninguna conclusión bien fundada. Hay enfoques que critican el método neoclásico, sea por la importancia que da a las matemáticas o por su ideología constitutiva (reducir el hombre a un autómata calculador, sin dimensión social o histórica), críticas que se hacen unas veces de forma explícita y otras en la práctica.

En el primer caso se encuentran los "heterodoxos" (marxistas, regulacionistas, postkeynesianos). Recuerdan que las acciones individuales se inscriben necesariamente en una estructura social preexistente, que debe tomarse como punto de arranque del análisis: mientras la estructura social de los neoclásicos está implícitamente contenida en el subastador, los heterodoxos consideran los grupos sociales, las etapas históricas y otros condicionantes sociales.

Al segundo grupo pertenece la mayoría de los economistas prácticos, especialmente los macroeconomistas, que utilizan sus modelos con fines predictivos o explicativos; si bien es cierto que estos modelos tienen un marco teórico de inspiración neoclásica, adoptan desde el principio una visión global. El énfasis se pone en la coherencia interna (sobre todo desde el punto de vista contable, con flujos de renta, de ahorro, de inversiones): es indiscutible que las familias consumen y ahorran; que las empresas producen, invierten y venden, etc.; y que todas las cuentas deben estar equilibradas.

Lo que unos y otros buscan es descubrir las tendencias principales o, al menos, poner de manifiesto algunas regularidades que permitan comprender mejor a las sociedades que nos rodean. Esta comprensión exige dialogar con las otras ciencias humanas, como la sociología, la historia o la psicología. Tal perspectiva no excluye el uso de las matemáticas, que son útiles para simplificar ciertas presentaciones, analizar interdependencias o despejar las hipótesis subyacentes a ciertos razonamientos, pero se les asigna un papel subordinado.

Observar la realidad cotidiana, recoger datos y tratarlos, puede que no sean actividades muy atractivas para alguien a quien sus estudios le han familiarizado con técnicas matemáticas complejas, les ha cogido gusto y ha sido seleccionado profesionalmente por ello, pero son tareas indispensables que, aparte su aspecto práctico, pueden conducir a innumerables reflexiones teóricas. Un caso célebre es el de la curva de M. Philipps, de la London School of Economics. En 1958, Philipps creyó observar que existía una relación inversa entre inflación y desempleo; esto se pone en duda actualmente, pero ha suscitado muchas discusiones e interpretaciones. A través de los estudios aplicados, vuelven a encontrarse los grandes debates que constituyen la esencia de la economía política.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENERAL COMPETITIVE ANALYSIS. K. Arrow y Frank Hahn. Holden Day, San Francisco, 1971.

LA THÉORIE DE LA RÉGULATION: UNE ANALYSE CRITIQUE. Robert Boyer. La Découverte, 1986.

L'ÉCONOMIE NÉO-CLASSIQUE. Bernard Guerrien. La Découverte (colección Repères), 1989.

VOIES DE RECHERCHE DE LA MACRO-ÉCONOMIE. Edmond Malinvaud. Odile Jacob, 1991.

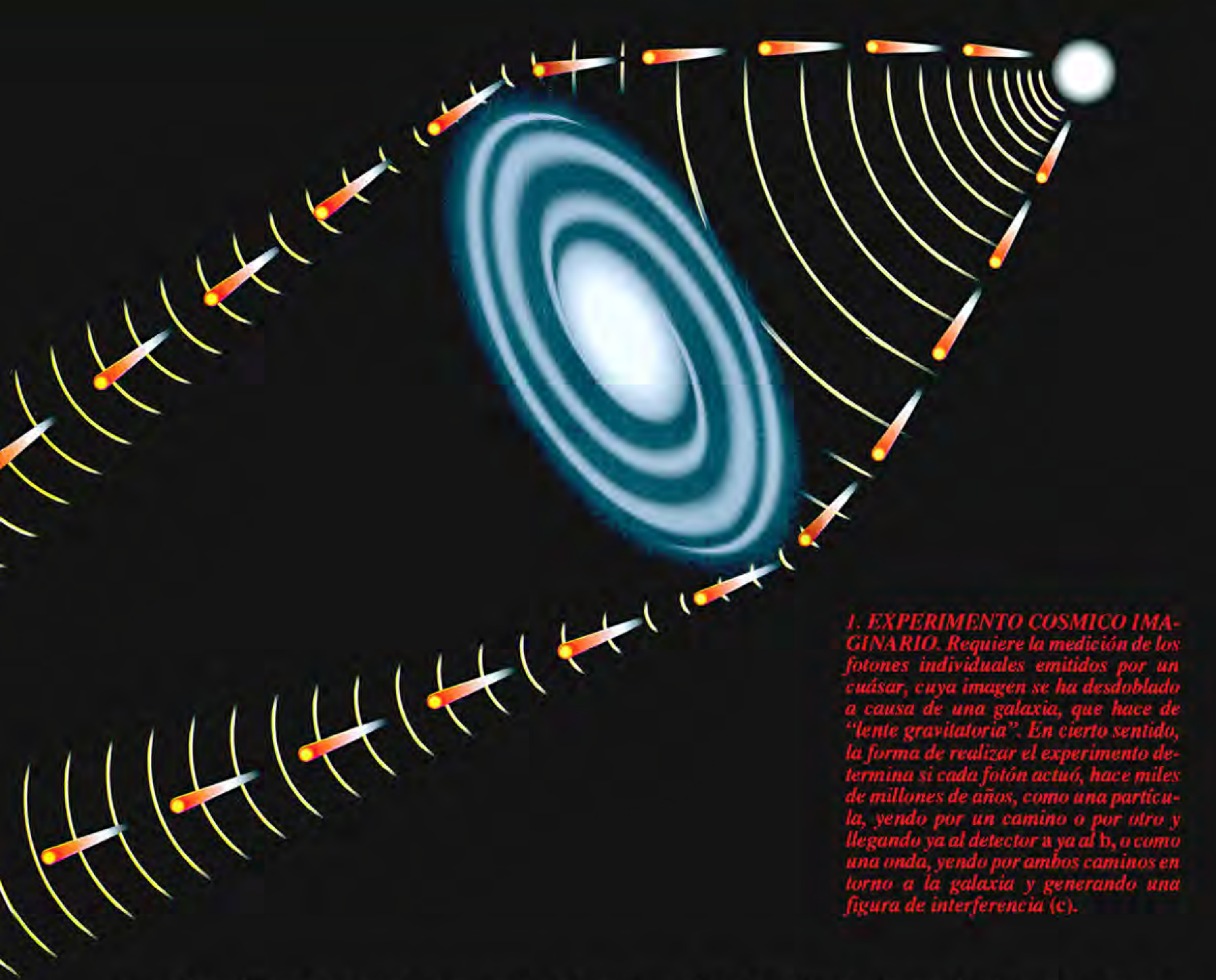
FILOSOFIA CUANTICA

John Horgan

Nuevos experimentos, reales e imaginarios, exploran con profundidad creciente el alucinante reino cuántico.

En la antigua Grecia, Platón intentaba elaborar y explicar su método para alcanzar la verdad merced a inacabables charlas con sus discípulos. Leonard Mandel, de la Universidad de Rochester, podría ejemplificar la distinta forma en que actúan los físicos actuales. El y sus estudiantes pasan incontables horas inclinados sobre una gran mesa metálica intentando alinear un láser con una complicada red de espejos, lentes, desdobladores de haz y detectores de luz.

Pero las cuestiones que se plantean en su laboratorio, abarrotado de equipos, no son menos profundas que las consideradas por Platón en su herboso patio. ¿Cuáles son los límites del conocimiento hu-



1. EXPERIMENTO COSMICO IMAGINARIO. Requiere la medición de los fotones individuales emitidos por un cuásar, cuya imagen se ha desdoblado a causa de una galaxia, que hace de "lente gravitatoria". En cierto sentido, la forma de realizar el experimento determina si cada fotón actuó, hace miles de millones de años, como una partícula, yendo por un camino o por otro y llegando ya al detector a ya al b, o como una onda, yendo por ambos caminos en torno a la galaxia y generando una figura de interferencia (c).

mano? ¿Influye de alguna manera sobre el mundo físico la percepción que tenemos de él? ¿Hay aleatoriedad en el universo o todos los sucesos están predeterminados?

Mandel, que es más bien modesto, describe su cometido con menos grandilocuencia. "Tratamos de entender las implicaciones de la mecánica cuántica", dice. "El tema es muy antiguo, pero aún estamos aprendiendo."

La verdad es que ha pasado casi un siglo desde que Max Planck propusiera que la radiación electromagnética se presenta en forma de pequeños paquetes de energía, llamados cuantos. Basándose en esta suposición, insustancial en apariencia, se ha construido la teoría más exitosa, con mucho, de la historia de la ciencia. Además de explicar todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza, salvo la gravedad, la mecánica cuántica ayuda a entender fenómenos tan dispares como el brillo de las estrellas y el orden de la tabla periódica. Sus consecuencias técnicas abarcan desde los reactores nucleares a los láseres.

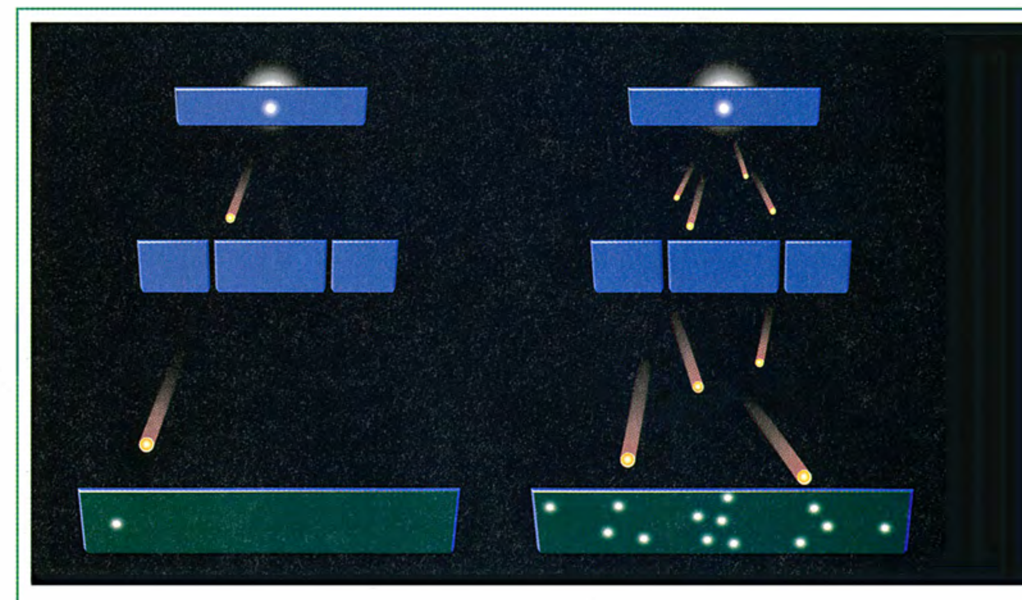
Y, sin embargo, la teoría cuántica tiene implicaciones muy inquietantes. Una de ellas es que hizo pedazos las ideas tradicionales de causalidad. La elegante ecuación planteada por Erwin Schrödinger en 1926 para describir el desarrollo de los sucesos cuánticos no ofrecía certezas, como las proporcionadas por la mecánica newtoniana, sino tan sólo una onda variable de posibilidades. El principio de indeterminación de Werner Heisenberg mostró a renglón seguido que nuestro conocimiento de la naturaleza tiene limitaciones esenciales: tan pronto aprehendemos una parte, otra se nos escapa por entre los dedos.

Los fundadores de la física cuántica les dieron muchas vueltas a estos temas. En 1905, Albert Einstein demostró que el efecto fotoeléctrico (la inducción de una corriente eléctrica por la luz que incide sobre un metal) podía explicarse mediante los cuantos electromagnéticos de Planck, a los que ahora llamamos fotones; pero luego no se cansó de repetir que, tras los caprichos de la mecánica cuántica, tenía que haber una teoría más detallada y completamente determinista. No satisfecho con su declaración de que "Dios no juega a los dados", proyectó experimentos imaginarios para demostrar la "falta de razonabilidad" de la teoría. Sus defensores, Niels Bohr entre ellos, armados con su propia batería de experimentos mentales, afirmaron que las objeciones de Einstein sólo eran el reflejo de hipótesis anticuadas sobre la naturaleza de la realidad y del conocimiento. Bohr se chanceaba de su amigo diciéndole que no era competencia de los físicos "indicarle a Dios cómo debía gobernar el mundo".

Hasta hace poco, la mayoría de los físicos había adoptado una actitud utilitaria: si la teoría puede predecir el funcionamiento de un semiconductor de arseniuro de galio dopado, ¿por qué preocuparnos de sus implicaciones epistemológicas? Pero un grupo cada vez más numeroso de investigadores se ha dedicado a sondear los misteriosos fundamentos de su oficio, durante el pasado decenio más o menos. Nuevas posibilidades técnicas, algunas basadas en los propios fundamentos cuánticos que analizan, les han permitido realizar experimentos que Einstein y Bohr sólo pudieron soñar. Estos logros, a su vez, han dado pie a los teóricos para imaginar pruebas todavía más desafiantes e incluso extrañas.

El objetivo de los buscadores de la verdad cuántica no es construir ordenadores más rápidos o dispositivos de comunicaciones, aunque no se excluya que algo de esto pueda resultar de la investigación. Pocos son los que confían en "desaprobar" una teoría confirmada en incontables experimentos. Lo que intentan es aclarar la curiosa realidad del mundo cuántico. "Para mí, la finalidad principal de hacer los experimentos es mostrar a la gente cuán extraña es la física cuántica", dice Anton Zeilinger, de la Universidad de Innsbruck, teórico y experimentalista a la vez. "La mayoría de los físicos son muy ingenuos y aún creen en ondas o partículas reales."

Hasta ahora, los resultados justifican los peores temores de Einstein.



La doble personalidad de la luz

Los experimentos de dos rendijas ponen de manifiesto la dualidad onda-partícula de la luz y otras formas de radiación electromagnética. Un fotón aislado incide sobre la pantalla en un cierto lugar, como si fuese una par-

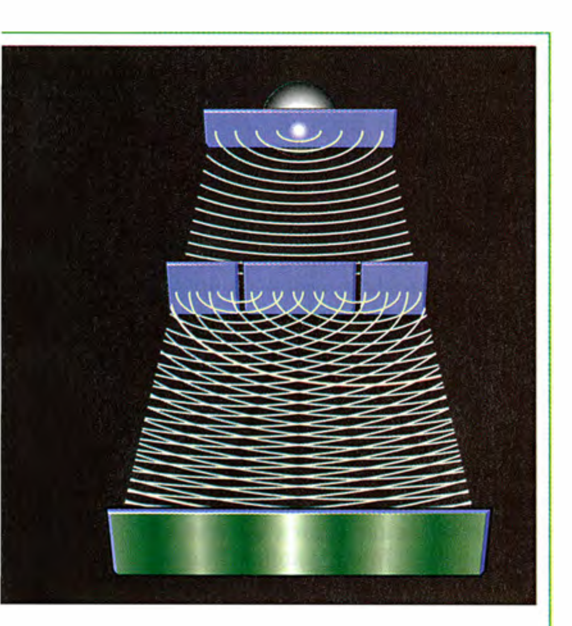
Los fotones, los neutrones, e incluso átomos enteros, actúan a veces como ondas y a veces como partículas, sin que, de hecho, tengan una forma definida hasta que se miden. Las medidas, una vez realizadas, pueden también eliminarse, modificando así el resultado de un experimento que ya sucedió. Una medida de una entidad cuántica puede influenciar instantáneamente a otra alejada de ella. Y tan raro comportamiento puede tener lugar no sólo en el dominio microscópico, sino incluso en objetos suficientemente grandes para ser observados a simple vista.

Estos hallazgos han provocado un resurgimiento del interés en "interpretaciones" de la mecánica cuántica, con vistas a colocarla en un marco sensato. Pero las interpretaciones actuales son cualquier cosa menos sensatas. Algunas conjuran multitud de universos. Otras requieren la creencia en una lógica que permite que dos juicios contradictorios sean verdaderos. "Einstein dijo que, si la mecánica cuántica fuese correcta, el mundo estaría loco", afirma Daniel Greenberger, un teórico del City College de Nueva York. "Pues bien, Einstein tenía razón. El mundo está loco."

La causa profunda de esta patología es la personalidad esquizofrénica de los fenómenos cuánticos, que en un momento dado actúan como ondas y, al siguiente, como partículas. El misterio de la dualidad onda-partícula viene de lejos, al menos en el caso de la luz. Nada menos que Newton fue quien propuso que la luz estaba formada por "corpúsculos", pero un clásico experimento realizado por Thomas Young a comienzos del siglo XIX convenció al grueso de la comunidad científica de que la luz era esencialmente ondulatoria.

Young hizo pasar un haz de luz a través de una placa que tenía dos estrechas rendijas, incidiendo sobre una pantalla situada al otro lado. Si la luz estuviera formada por partículas, sólo deberían aparecer dos líneas brillantes en la pantalla. Lo que realmente se formaba, en cambio, era una serie de líneas, cuya única explicación posible era suponer que la luz se propagaba como las ondas, desdoblándose en pares de ondas más pequeñas al atravesar las rendijas del dispositivo. La figura de la pantalla se formaba por la superposición, o interferencia, de los pares de ondas. La coincidencia de crestas originaba puntos brillantes, mientras que una cresta y un valle se cancelaban entre sí, resultando en una zona oscura.

Experimentos más recientes con dos rendijas indican, empero, que Newton también tenía razón. Los modernos fotodetectores (basados en el efecto fotoeléctrico explicado por Einstein) muestran que los fotones, o



tícula (*izquierda*). Al aumentar el número de fotones, empieza a aparecer una figura de interferencia (*centro*). Tal figura exige que cada fotón haya pasado a través de ambas rendijas, como si fuese una onda (*derecha*).

cuantos de luz, individuales se acumulan en la pantalla, detrás de las rendijas, en puntos y tiempos determinados, como si fuesen partículas. Pero, a medida que continúan incidiendo sobre la pantalla, va apareciendo poco a poco la figura de interferencia, señal inequívoca de que cada fotón individual pasó a través de ambas rendijas, como una onda.

Es más, si el investigador sólo abre una rendija cada vez, o si coloca los detectores lo suficientemente cerca de ellas, para determinar qué camino ha seguido cada fotón concreto, los fotones pasan a través de una rendija o de la otra y la figura de interferencia desaparece. Se diría que actúan como ondas siempre que se les permita hacerlo, distribuyéndose por el espacio sin ninguna posición definida. Pero tan pronto como alguien pregunte dónde están, a base de determinar por qué rendija pasaron, o haciéndoles incidir sobre una pantalla, bruscamente se convierten en partículas.

La dualidad onda-partícula es todavía más desconcertante de lo que sugiere esta explicación, como puso de manifiesto John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, mediante un experimento mental que imaginó en 1980. El estudió con Bohr en los años treinta y recuerda: "Bohr solía decir que si alguien no queda confundido por la física cuántica, es que no la ha entendido bien." Ahora es uno de los exploradores más audaces del mundo cuántico.

En los experimentos de las dos rendijas, la elección del aparato hecha por el físico fuerza al fotón a decantarse entre pasar a través de ambas, como una onda, o de una sola, como una partícula. Pero ¿qué pasaría, se preguntó Wheeler, si, de alguna manera, el investigador pudiera esperar hasta que la luz hubiera pasado ya por las rendijas para decidir cómo observarla?

Cinco años después de que se le ocurriera lo que llamó el experimento de elección retardada, dos grupos independientes, de las universidades de Maryland y Munich, lo llevaron a cabo. Dirigieron un haz láser no contra una placa con dos rendijas, sino contra un desdoblador de haz, un espejo recubierto con la cantidad de plata justa para reflejar la mitad de los fotones que incidieran sobre él y dejar pasar a su través la otra mitad. Una vez así separados, una serie de espejos los volvían a juntar, dirigiéndolos a un detector.

Como este montaje inicial no proporcionaba manera alguna de que los investigadores supieran si un determinado fotón había tomado el camino de la derecha o el de la izquierda en el desdoblador, cada fotón seguía ambos caminos, transformándose en dos pequeñas ondas que acababan interfiriendo entre sí en el detector.

Una vez comprobado esto, se instaló un cristal especial, llamado celda de Pockels, en medio de uno de los caminos. La aplicación de una corriente eléctrica a la celda de Pockels difractaba los fotones a un detector auxiliar; sin ella, la atravesaban sin alterarse. Un generador de señal aleatoria permitía conectar o desconectar la celda después de que el fotón hubiera pasado ya por el desdoblador de haz, pero antes de que alcanzara el detector, como Wheeler había especificado.

Al activar la celda de Pockels, el fotón se comporta como una partícula y pasa por un camino o por otro, pero no por ambos, incidiendo sobre el detector auxiliar o sobre el primario. Mas si la celda de Pockels está desconectada, aparece una figura de interferencia en el detector situado al final de ambos recorridos, lo que indica que el fotón ha seguido los dos caminos.

Para subrayar la rareza de este efecto, Wheeler indica que los astrónomos pueden realizar un experimento de elección retardada usando la luz de los cuásares, objetos misteriosos y de brillo extraordinario que se encuentran cerca de los límites del universo. En lugar del desdoblador de haz y de los espejos, se precisa de una lente gravitatoria, una galaxia u otro objeto de gran masa que desdoble la luz de un cuásar y la refocalice en la dirección de un observador distante, creando dos o más imágenes del cuásar.

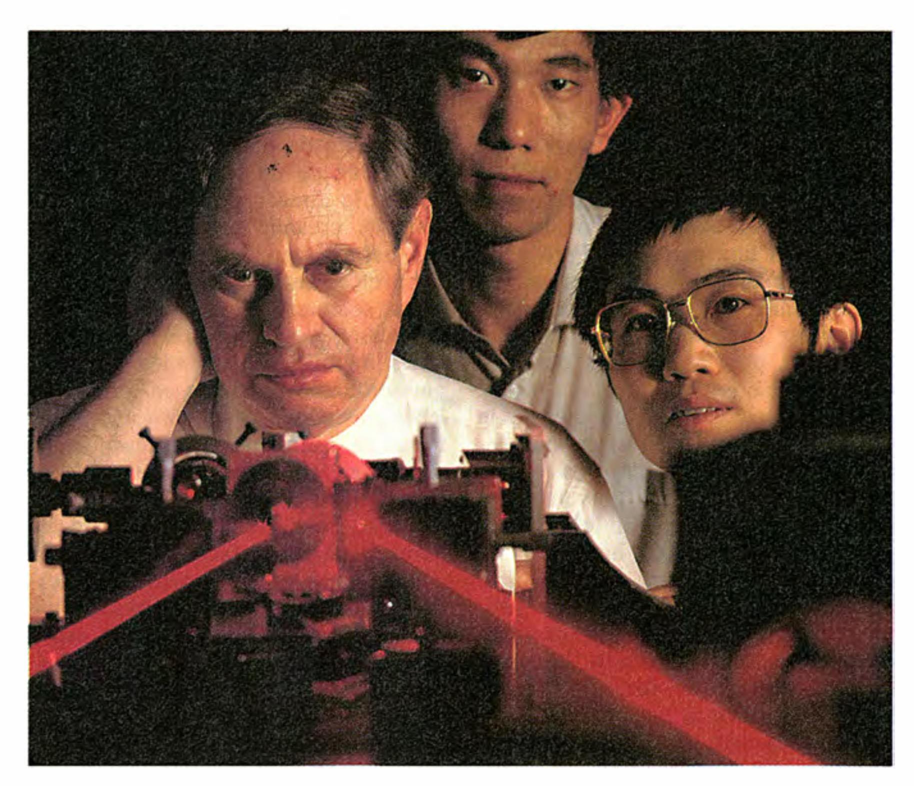
La elección del astrónomo, aquí y ahora, sobre cómo observar los fotones del cuásar parece determinar que hace miles de millones de años éstos siguiesen ambos caminos en torno a la lente gravitatoria o tan sólo uno. Conforme se aproximaban al desdoblador de haz galáctico, los fotones debieron haber tenido una especie de premonición que les dijera cómo debían comportarse para satisfacer una elección que harían más tarde seres no nacidos en un planeta aún inexistente.

La falacia que origina tales especulaciones es, según Wheeler, el suponer que un fotón tenga una forma física antes de que el astrónomo lo observe: tenía que ser una onda o una partícula y, en consecuencia, pasar por ambos caminos en torno a la galaxia o sólo por uno. La verdad, dice, es que los fenómenos cuánticos no son ni ondas ni partículas, sino que están intrínsecamente indefinidos hasta el momento en que se miden. En cierto sentido, tenía razón el filósofo y obispo británico Berkeley cuando afirmaba, hace dos siglos, que "ser es ser percibido".

Los riesgos de saber demasiado

Las reflexiones del físico británico Sir Arthur Eddington sobre la mecánica cuántica le llevaron a lamentar, hace unos sesenta años, que la teoría tuviese tanto sentido como los parloteos de algún personaje de Lewis Carroll. Por desgracia, la jerga de la mecánica cuántica es bastante menos animada. Se dice que un ente cuántico no observado existe en una "superposición coherente" de todos los posibles "estados" permitidos por su "función de ondas". Pero, tan pronto como un observador hace una medida capaz de distinguir entre esos estados, la función de ondas "se colapsa" o "se reduce" y el ente se ve forzado a adoptar un estado determinado.

Incluso esta forma de hablar, deliberadamente abstracta, contiene algunas implicaciones engañosas, entre ellas la de que la medida exija una intervención física directa. Los físicos suelen explicar el principio de indeterminación del siguiente modo: al medir la posición de un ente cuántico, es inevitable perturbar su evolución, con lo que se pierde información acerca



2. LEONARD MANDEL y sus colaboradores rodean un convertidor paramétrico de baja, un cristal poco corriente que convierte cualquier fotón que incida sobre él en dos fotones de la mitad de energía. Mandel ha sido pionero en el uso del dispositivo para explorar la mecánica cuántica.

de su dirección y fase, la posición relativa de sus crestas y valles.

Es cierto que la mayoría de los experimentos implican mediciones perturbadoras. Por ejemplo, bloquear un camino u otro, o acercar los detectores a las rendijas, son actos que claramente manipulan el paso de los fotones en el experimento de las dos rendijas; otro tanto sucede, en el de la elección retardada, cuando se coloca un detector en uno de los caminos. Pero hay otro experimento, realizado el pasado año por el equipo de Mandel en la Universidad de Rochester, que indica que puede forzarse a un fotón a cambiar su comportamiento, de ondulatorio a corpuscular, de forma mucho más sutil que la intervención directa.

Se basa en un convertidor paramétrico de baja, una lente poco corriente que desdobla un fotón de determinada energía en otros dos fotones, cuya energía es sólo la mitad del primero. Aunque tal dispositivo fue desarrollado hacia 1960, el grupo de Rochester fue pionero en su uso en pruebas de mecánica cuántica. En el experimento, un láser lanza luz hacia un desdoblador de haz. Los fotones reflejados se dirigen a un convertidor de baja y los transmitidos van a otro. Cada uno de ellos desdobla cualquier fotón que le llegue en dos de menor frecuencia; a uno se le llama señal y, al otro, testigo. Los dos convertidores de baja se disponen de manera que los dos haces testigo se unan en un único haz. Unos espejos dirigen los testigos solapados a un detector y los dos haces de señal a otro detector separado.

Este montaje no permite que un observador sepa el camino seguido por un fotón determinado al atravesar el desdoblador de haz. Por tanto, cada fotón va a la vez a la derecha y a la izquierda, como una onda, y pasa por ambos convertidores de baja produciendo dos pequeñas ondas de señal y dos ondas testigo. Las ondas señal generan una figura de interferencia en su detector, que se pone de manifiesto a base de aumentar gradualmente la distancia entre el convertidor y el detector: el ritmo de detección sube y baja a medida que las crestas y los valles de las ondas interferentes se desplazan unas respecto a otras, estando unas veces en fase y otras desfasadas.

Ahora viene la parte chocante. Los fotones señal y los fotones testigo, una vez emitidos por los convertidores de baja, ya nunca cruzan de nuevo sus trayectorias; avanzan hacia sus respectivos detectores independientemente unos de otros. Sin embargo, si el investigador bloquea la trayectoria de un conjunto de fotones testigo, se destruye la figura de interferencia de los fotones señal. ¿Qué ha cambiado?

La respuesta es que ha cambiado el conocimiento potencial del observador. Ahora puede determinar qué camino tomaron los fotones señal para alcanzar su detector, si compara sus tiempos de llegada con los de los testigos que quedan, los no bloqueados. El fotón original ya no puede tomar ambos caminos en el desdoblador de haz, como una onda, sino que debe rebotar o pasar, como una partícula.

De hecho, para destrozar la figura de interferencia no hace falta realizar la comparación entre los tiempos de llegada. La simple "amenaza" de obtener información acerca de qué camino tomó el fotón, explica Mandel, le fuerza a seguir una única trayectoria. Y prosigue: "El estado cuántico no sólo refleja lo que sabemos acerca del sistema, sino lo que en principio es cognoscible."

Una vez realizada la amenaza de obtener información comprometedora, ¿puede retirarse? En otros términos, ¿son reversibles las medidas? Muchos teóricos, entre ellos Bohr, pensaban que no, y la expresión "colapso de la función de ondas" refleja esta creencia. Pero Marlan O. Scully, de la Universidad de Nuevo Mexico, sostiene desde 1983 que debe ser posible obtener información acerca del estado de un fenómeno cuántico, destruyendo así sus propiedades ondulatorias, y restaurarlas después a base de "borrar" la información.

Varios grupos que trabajan con interferometría óptica, el de Mandel incluido, afirman haber conseguido lo que Scully denomina un "borrador cuántico". El que se ha acercado más, según Scully, es el dirigido por Raymond Y. Chiao, de la Universidad de California en Berkeley.

A comienzos de este año, el grupo de Chiao dirigió un haz de luz a través de un cristal convertidor de baja, generando dos fotones idénticos. Después de dirigirlos con espejos por dos rutas separadas, volvieron a cruzar sus trayectorias en un espejo semiplateado, tras de lo que llegaban a dos detectores. Es imposible saber qué fotón acabó en cada detector, por lo que todos parecen haber ido por ambos caminos. Como en el experimento de Mandel, la figura de interferencia se revelaba alargando lentamente un brazo del detector; un dispositivo llamado contador de coincidencia mostraba el disparo simultáneo de los dos detectores de fotones, que aumentaba o disminuía según las ondas estuviesen en fase o no.

Añadieron entonces al interferómetro un dispositivo que desplazaba la polarización de un grupo de fotones en 90 grados. Si se imagina que un rayo de luz fuese una flecha, la polarización es la orientación del plano de su punta. La polarización es una propiedad estrictamente binaria; los fotones están siempre polarizados, ya vertical ya horizontalmente. La polarización alterada sirve a modo de etiqueta; si se colocan detectores de polarización delante de los detectores ordinarios situados al final de las trayectorias, se puede determinar qué camino siguió cada fotón. Las dos trayectorias ya no son indistinguibles y la figura de interferencia desaparece.

Por último, insertaron ante los detectores dos dispositivos que sólo dejaban pasar luz polarizada en una dirección. Las trayectorias volvían a ser indistinguibles y la figura de interferencia reapareció; una función de ondas colapsada puede volver a reconstruirse.

Arte de encantamiento

Siguiendo otra propuesta de Scully, Chiao ha llegado incluso a proponer una manera de demorar la decisión de restaurar o no la figura de interferencia hasta después de que los fotones hayan llegado a los detectores. Los simples filtros polarizantes previos se substituyen por desdobladores de haz polarizantes, que dirigen los fotones de polarizaciones opuestas a detectores distintos. Un ordenador almacena los datos de los tiempos de llegada de todos los fotones en un fichero y su polarización en otro. Cuando se analizan todos los datos sin atender a la polarización, los tiempos de llegada no indican figura de interferencia alguna. Pero, si se separan los fotones de polarizaciones distintas y se representan independientemente, surgen dos figuras de interferencia diferentes.

Tales ideas provocan escándalo en algunos sitios. Edwin T. Jaynes, de la Universidad de Washington, un distinguido escéptico de la mecánica cuántica, habló de "nigromancia medieval" al referirse en un trabajo suyo al borrador cuántico; la observación satisfizo tanto a Scully que la incluyó en un reciente artículo sobre el tema.

La nigromancia no le llega a la suela del zapato a la no localidad. Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen fueron los primeros que, en 1935, llamaron la atención sobre esta rara propiedad cuántica (que actualmente se suele denominar el efecto EPR en su honor) con un experimento mental proyectado para probar que la mecánica cuántica tenía fallos insalvables. ¿Qué sucedería, se preguntaban Einstein y sus colaboradores, si una partícula formada por dos protones se desintegrase, enviando los protones en direcciones opuestas? Según la mecánica cuántica, mientras ambos protones permanezcan inobservados, sus propiedades se mantienen indefinidas, en una superposición de todos los estados posibles; lo que significa que cada uno de ellos viaja en todas las direcciones posibles.

Pero, debido a su común origen, sus propiedades están estrechamente correlacionadas, o "enredadas". Por ejemplo, basta la simple conservación del momento para saber que, si un protón se dirige al norte, el otro debe dirigirse al sur. En consecuencia, al medir el momento de uno de ellos, se determina simultáneamente el del otro, aunque se encuentre en el extremo opuesto del universo. Einstein decía que esta "misteriosa acción a distancia" era incompatible con cualquier modelo "realista" de la realidad; todas las propiedades de cada protón deben estar fijadas desde el momento en que empiezan a alejarse.

Hasta comienzos de los años sesenta, la mayoría de los físicos consideraban que el problema era puramente académico, ya que nadie podía imaginar una forma de resolverlo experimentalmente. Pero, en 1964, John S. Bell, del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, demostró que la mecánica cuántica predecía mayores correlaciones estadísticas entre partículas relacionadas que las predichas por las llamadas teorías realistas locales, preferidas por Einstein. Los trabajos de Bell provocaron una efervescencia de trabajo experimental, que culminó en un experimento clásico (aunque no de física clásica) realizado hace diez años por Alain Aspect, de la Universidad de París.

En vez del momento, Aspect analizó la polarización de pares de fotones emitidos por una única fuente hacia detectores separados. Al ser medida de forma independiente, la polarización de cada conjunto de fotones fluctuaba de manera al parecer aleatoria. Pero, si se comparaban los dos conjuntos de medidas, presentaban un acuerdo mayor que el que podía explicarse con cualquier teoría realista local, tal como Bell había predicho. La misteriosa acción a distancia de Einstein era real.

Hasta hace poco, ningún experimento había demostrado con éxito que el efecto EPR fuese cierto para el momento, como Einstein, Podolsky y Rosen propusieron originalmente. Hace dos años, John G. Rarity y Paul R. Tapster, del Royal Signals and Radar Establishment, de Inglaterra, lo lograron por fin.

El experimento empieza con un láser dirigido hacia un convertidor de baja, que produce pares de fotones correlacionados. Después, los fotones pasan por sendos aparatos de dos rendijas, llegando a los correspondientes detectores. La conservación del momento permite determinar el camino de un fotón si se sabe la trayectoria de su compañero. Pero el dispositivo de espejos y de separadores de haz hacía imposible establecer el camino real de ninguno de ellos.

A continuación, los investigadores alargaron ligeramente una de las cuatro trayectorias, como había hecho Chiao en su experimento del borrador cuántico. El ritmo con el que los fotones llegan a cada detector no varía por ello, pero el ritmo de señales simultáneas registrado por un contador de coincidencia oscilaba, formando una reveladora figura de interferencia, como la observada por Chiao. Tal figura sólo puede formarse si cada fotón, el de la izquierda y el de la derecha, hubiera pasado a través de ambas rendijas hacia su respectivo detector, con su momento fundamentalmente indefinido, pero, a pesar de ello, correlacionado con el de su alejado compañero.

Se han propuesto experimentos EPR aún más ambiciosos, que todavía no se han llevado a cabo. Greenberger, Zeilinger y Michael Horne, del Stonehill College, han demostrado que tres o más partículas que salen de una única fuente presentarán una correlación no local mucho mayor que la que hay entre sólo dos partículas. Bernard Yurke y David Stoler, de los Laboratorios AT&T Bell, han sugerido incluso una manera de que tres partículas, emitidas desde sitios separados, presenten el efecto EPR.

Por desgracia, el efecto EPR no proporciona una escapatoria de la teoría de la relatividad, que prohíbe comunicaciones más rápidas que la luz, ya que cada observador aislado de una partícula correlacionada sólo ve una fluctuación de propiedades aparentemente aleatoria. Pero sí permite transmitir con fiabilidad un número aleatorio, que, a su vez, puede servir de "clave" numérica para un sistema de codificación. De hecho, tal dispositivo ha sido construido por Charles H. Bennett, del IBM Thomas J. Watson Research Center.

Un realista duro de pelar podría rechazar los experimentos descritos, pues todos implican la quintaesencia

de la inefabilidad, la luz. Pero electrones, neutrones, protones e incluso átomos enteros, la materia de que está hecho nuestro propio cuerpo, también presentan comportamientos patológicos. Los investigadores han observado comportamiento ondulatorio en electrones, mediante métodos indirectos, desde 1920 y los experimentos de dos rendijas empezaron a realizarse con electrones hace unos 20 años.

Filósofos superpuestos

Puede que pronto se realice una nueva ronda de experimentos con electrones, si Yakir Aharonov, de la Universidad de Tel Aviv, logra poner en práctica su idea. Aunque la superposición normalmente se infiere de observaciones de un gran número de partículas, él mantiene que se podría detectar un único electrón, ligado a un átomo de hidrógeno difuminado en una cavidad relativamente grande, digamos de 10 centímetros, mediante una muy suave dispersión de fotones que incidieran sobre él.

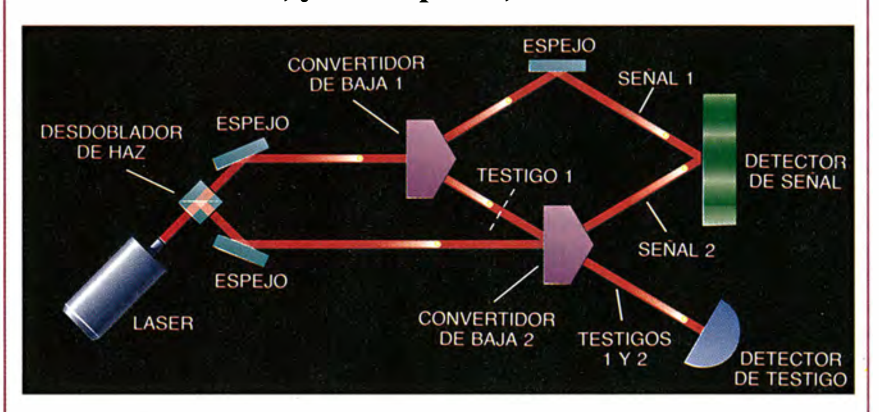
Aharonov aún no ha publicado su idea ("pienso muy deprisa, pero escribo muy despacio", dice) y algunos físicos con los que la ha discutido no la ven muy clara. También hubo muchos escépticos en 1958, cuando él y David Bohm, de la Universidad de Londres, sugirieron una manera de que un campo magnético influenciase un electrón que, en sentido estricto, permanecía completamente fuera del alcance del campo. Y, sin embargo, el llamado efecto Aharonov-Bohm se ha confirmado en los laboratorios.

Desde mediados los años setenta, varios investigadores han realizado experimentos de interferencia con neutrones, que son casi 2.000 veces más pesados que los electrones. Por ejemplo, hace unos quince años, Samuel A. Werner y colaboradores, de la Universidad de Missouri en Columbia, encontraron que la figura de interferencia formada por neutrones, difractados en dos trayectorias por un cristal de silicio tallado, podía alterarse sólo con cambiar la orientación del interferómetro en relación al campo gravitatorio de la Tierra. Fue la primera demostración de que la ecuación de Schrödinger era válida bajo la influencia del campo gravitatorio.

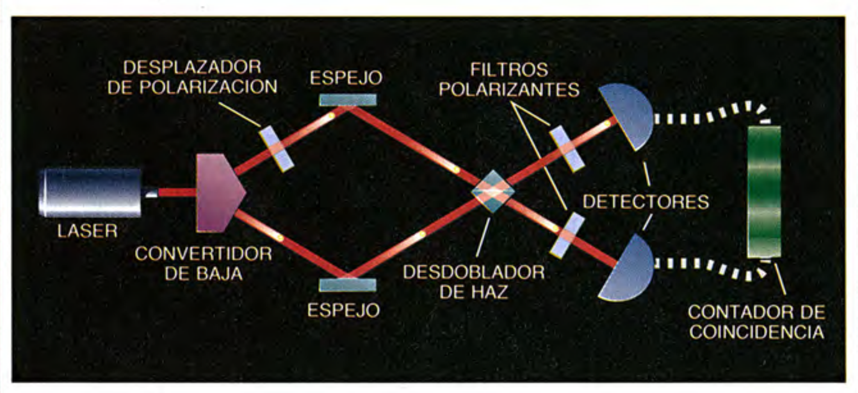
No se ha empezado a hacer interferometría con átomos enteros más que en los últimos años. Son experimentos extraordinariamente difíciles. Los átomos no pasan a través de cristales o de lentes como lo hacen los fotones, los electrones o incluso los neutrones. Además, como la longitud de onda de un objeto es inversamente proporcional a su masa y su velocidad, la partícula debe moverse lentamente para que su longitud de onda sea detectable. Esto no ha impedido a investigadores como David E. Pritchard, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, crear el equivalente de desdobladores de haz, espejos y lentes para átomos, a base de placas metálicas estriadas, trabajadas con precisión, e incluso ondas luminosas estacionarias, que se forman cuando una onda luminosa se refleja sobre sí misma de manera que sus crestas y valles coincidan exactamente.

Pritchard cree que puede llegar el día en que los físicos sean capaces de hacer pasar por un interferómetro moléculas biológicamente importantes, tal vez proteínas o ácidos nuclei-

Cómo destruir, y recomponer, una onda luminosa



Es la información, más que la intervención directa, lo que destruye el comportamiento ondulatorio. Un láser lanza fotones a través de un espejo semiplateado hacia dos convertidores de baja, 1 y 2. Cada fotón incidente se convierte en dos fotones de menor energía, llamados señal y testigo. Como el detector de señal no puede determinar por qué vía llegaron las señales, cada una de ellas toma ambos caminos, como ondas, generando una figura de interferencia. Para destruirla basta con bloquear los testigos del convertidor 1 (*línea de puntos*). La razón es que ahora puede reconstruirse cada trayectoria de señal; la detección simultánea de una señal y un testigo indicaría que ambos provienen de un fotón reflejado por el desdoblador de haz hacia el convertidor 2.



Si se borra la información sobre la trayectoria de un fotón, se restablece el comportamiento ondulatorio. Pares de fotones idénticamente polarizados, producidos por un convertidor de baja, se hacen converger mediante espejos sobre un desdoblador de haz y pasan hacia dos detectores. Un contador de coincidencia genera una figura de interferencia a partir de los ritmos de detecciones simultáneas, lo que indica que cada fotón ha tomado ambos caminos en el desdoblador de haz, como una onda. Si se añade un desplazador de polarización en una de las trayectorias, se destruye la figura de interferencia, pues esto permite distinguir los fotones. Pero la colocación de dos filtros de polarización delante de los detectores vuelve a hacer que los fotones sean idénticos, borra la pista de la polarización y restablece la figura.

cos. En principio, no debería ser imposible observar comportamiento ondulatorio en un organismo completo, como una ameba, aunque hay algunas dificultades: la ameba tendría que moverse muy despacio; de hecho, tan despacio que tardaría unos tres años en pasar por el interferómetro, según sus cálculos. El experimento habría de realizarse, además, en un entorno completamente libre de influencias gravitatorias o de otra clase, es decir, en el espacio exterior.

Hacer que un organismo algo mayor y más inteligente, por ejemplo un filósofo, siguiera dos trayectorias a través de un aparato de dos rendijas sería aún más complicado. "Tardaría más que la edad del universo", dice Pritchard.

Aunque los físicos nunca puedan colocar a un filósofo en una superposición de estados, trabajan con intensidad para inducir el comportamiento ondulatorio en objetos literalmente grandes, como para poderse ver. La investigación ha reavivado el interés por un famoso experimento mental planteado por Schrödinger en 1935. La versión actual, modificada por John Bell, el teórico del EPR, para que sea más digerible por los amantes de los animales, consiste en colocar un gato en una caja junto con un trozo de material radioactivo; éste tiene un cincuenta por ciento de probabilidades de emitir una partícula en una hora. Cuando la partícula se desintegra, dispara un contador Geiger, que, a su vez, hace que una botella de leche se vierta en un tazón y alimente al gato. (En la versión de Schrödinger, un martillo rompía una ampolla de gas venenoso, que mataba al gato.)

El sentido común indica que un gato no puede tener el estómago lleno y vacío a la vez. Pero la mecánica cuántica dice que, al cabo de una hora, si nadie ha mirado al interior de la caja, la materia radioactiva y el gato están en una superposición de estados indistinguibles; la primera, a la vez desintegrada y no desintegrada, y el último, a la vez saciado y hambriento.

Se han propuesto diversas soluciones de la paradoja. Wojciech H. Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, mantiene que, a medida que un fenómeno cuántico se propaga, su interacción con el entorno hace que, inevitablemente, sus estados superpuestos se hagan distinguibles, lo que les hace colapsar en un único estado. Mandel cree que su experimento apoya este punto de vista, pues la mera posibilidad de conocer la trayectoria de un fotón destruye su figura de interferencia. Después de todo, es fácil saber si el gato se ha alimentado sin necesidad de perturbarlo; por ejemplo, basta con que la caja sea transparente.

Hace unos diez años que Anthony J. Leggett, de la Universidad de Illinois, sostiene, por el contrario, que debería ser posible observar un dispositivo superconductor de interferencia cuántica, más conocido como SQUID, en una superposición de estados. Un SQUID, cuyo tamaño normal es el de una cabeza de alfiler y, por tanto, es enorme en comparación con los átomos o con otros objetos cuánticos, consiste en un bucle de material superconductor, por el que fluyen electrones sin resistencia, interrumpido por una lámina delgada de material aislante, que recibe el nombre de unión Josephson. En un mundo clásico, los electrones quedarían completamente bloqueados por el aislante, pero la indefinición cuántica de sus posiciones permite que muchos de ellos se cuelen alegremente a través de la separación.

Inspirada por los cálculos de Leggett, Claudia D. Tesche, del IBM Watson Center, propuso un experimento que podría mostrar la superposición de manera bastante directa. Hace observar que, bajo ciertas condiciones, la corriente en un SQUID tiene la misma probabilidad de fluir en una dirección que en la otra. Luego, según la mecánica cuántica, debe ir en ambos sentidos, creando una figura de interferencia análoga a la formada en un experimento de dos rendijas.

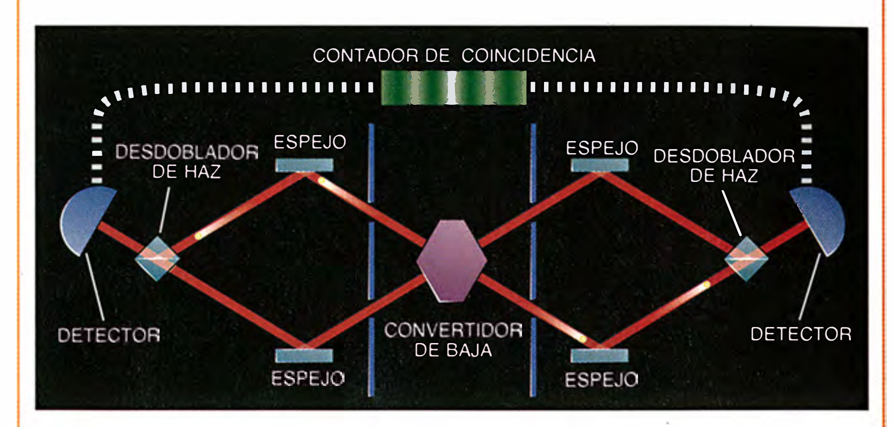
El montaje de Tesche exige colocar dos interruptores extremadamente sensibles alrededor del SQUID, cada uno de los cuales responde cuando la corriente va en una dirección determinada. Desde luego, una vez que un interruptor salte, la función de ondas colapsa y se destruye la figura de interferencia. Tesche espera poder inferirla de los microsegundos iniciales de inactividad de los interruptores, de manera que, en realidad, se trata de hacer medidas no haciéndolas.

Ataque a la ortodoxia

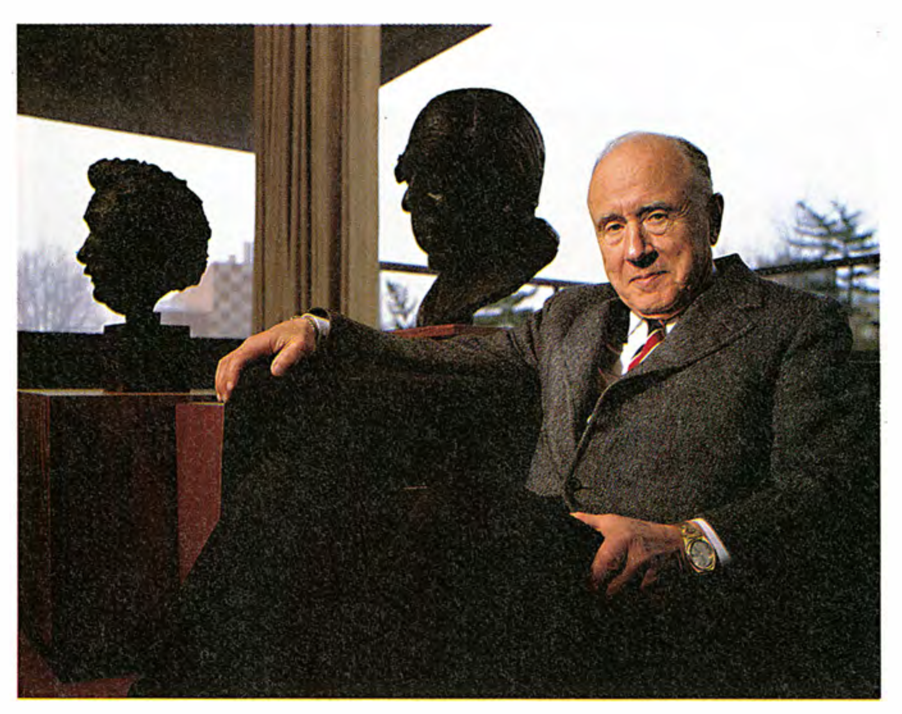
Otros teóricos indican que el experimento de Tesche es difícil en grado sumo, puesto que incluso pequeñas perturbaciones del entorno pueden hacer que la función de ondas del SQUID colapse. La verdad es que Tesche dedica ahora su atención a otros objetivos más convencionales y ha dejado de lado su experimento, al menos de momento, pues, según admite, "no estaba yendo muy bien".

Pero experimentos menos ambiciosos, realizados por John Clarke, de la Universidad de California en Berkeley, Richard A. Webb, de IBM, y otros investigadores, han aportado

Contacto entre partículas distantes



Esquema simplificado de un experimento que confirma misteriosas correlaciones entre fotones alejados. Un convertidor de baja envía pares de fotones en direcciones opuestas. Cada fotón atraviesa un aparato de dos rendijas independiente y se encamina mediante espejos hacia un detector. Como los detectores no distinguen por qué rendija ha pasado el fotón, va por ambos caminos, generando una figura de interferencia en el contador de coincidencia. Pero la dirección de cada uno de ellos está correlacionada con la de su compañero. Una medida que determine que un fotón va por la rendija superior izquierda forzará instantáneamente a su alejado compañero a pasar por la inferior derecha.



3. JOHN A. WHEELER junto a los bustos de dos viejos aventureros del mundo cuántico, Einstein y Bohr. Piensa que la mejor enseñanza de la mecánica cuántica quizá sea que la realidad se define mediante las preguntas que le planteamos.

pruebas convincentes, aunque indirectas, de que realmente un SQUID puede existir en una superposición de dos estados. Recurren a una propiedad llamada flujo, que es el área del anillo superconductor multiplicada por la intensidad del campo magnético perpendicular al mismo. En un anillo superconductor ordinario, el flujo sería constante, pero las medidas realizadas con magnetómetros indican que el flujo del SQUID salta espontáneamente de un valor a otro. Tales saltos sólo pueden tener lugar si el flujo está en una superposición de estados; como si estuviera al mismo tiempo hambriento y saciado, por así decirlo.

Los experimentos recientes, realizados o propuestos, no han llevado a un consenso sobre lo que significa exactamente la mecánica cuántica. Aunque sólo sea por defecto, el punto de vista "ortodoxo" sigue siendo el establecido por Bohr en los años veinte. Bajo la etiqueta de interpretación de Copenhague, su afirmación básica es que no podemos conocer más que lo que observamos; cualquier especulación acerca de lo que "realmente es" un fotón, un átomo o incluso un SQUID, o lo que les pueda pasar cuando no los observamos, no es más que eso, especulación.

Sin duda, la interpretación de Copenhague ha sido atacada en los últimos años por algunos teóricos, sobre todo por John Bell, autor de la brillante demostración de la divergencia entre predicciones "realistas" y cuánticas para los experimentos EPR. En una entrevista televisada justo antes de su muerte repentina, por un ataque al corazón hace un par de años, el físico irlandés expresó su insatisfacción con la interpretación de Copenhague, señalando que "dice que debemos aceptar el sinsentido". "¿Y eso le asusta?", preguntó el entrevistador. "No, sólo me molesta", replicó Bell sonriendo.

Las exhortaciones de Bell ayudaron a que volviese a considerarse con interés una teoría realista propuesta por Bohm en los años cincuenta. Desde su punto de vista, una entidad cuántica, así un electrón, existe realmente en un sitio y en un instante determinados, pero su comportamiento está regido por un campo inusual, u onda piloto, cuyas propiedades vienen definidas por la función de ondas de Schrödinger. La hipótesis acepta una rareza cuántica, la no localidad, pero elimina otra, la indefinición de la posición de una partícula. Sus predicciones son idénticas a las de la mecánica cuántica estándar.

Otra teoría favorecida por Bell fue la desarrollada hace seis años por Gian Carlo Ghirardi y Tullio Weber, de la Universidad de Trieste, y Alberto Rimini, de la de Pavía, refinada posteriormente por Philip Pearle, del Hamilton College. Añade un término no lineal a la ecuación de Schrödinger, haciendo que los estados superpuestos de un sistema converjan hacia un único estado a medida que el sistema se aproxima a las dimensiones macroscópicas; esto elimina la paradoja del gato de Schrödinger, entre otros embrollos.

A diferencia del concepto de onda piloto de Bohm, la teoría del grupo de Ghirardi ofrece predicciones que se apartan de las de la física cuántica ortodoxa, aunque sólo de manera sutil. "Si se lanza un neutrón a través de dos rendijas, se obtiene una figura de interferencia", afirma Pearle. "Pero, si nuestra teoría es correcta, la interferencia debe desaparecer al hacer la medida lo suficientemente lejos." También exige ligeras violaciones de la ley de conservación de la energía. Zeilinger, de la Universidad de Innsbruck, se interesó lo bastante por ella como para comprobar la predicción relativa al neutrón, con resultados negativos. Su conclusión es que "este intento es uno de esos callejones sin salida que alguien tiene que recorrer".

Otro punto de vista que actualmente goza de algún predicamento, aunque no como resultado de los esfuerzos de Bell, es la interpretación de los mundos múltiples, inventada en los años cincuenta por Hugh Everett III, de Princeton. Intenta contestar la pregunta de por qué, cuando observamos un fenómeno cuántico, sólo vemos un resultado de los muchos permitidos por su función de ondas. Everett sugirió que, cuando una medida obliga a una partícula a hacer una elección, por ejemplo, ir hacia la izquierda o hacia la derecha en un aparato de dos rendijas, todo el universo se desdobla en dos universos separados; la partícula va hacia la izquierda en un universo y hacia la derecha en el otro.

Considerada durante mucho tiempo más propia de la ciencia ficción que de la ciencia a secas, Murray Gell-Mann y James B. Hartle han retomado esta idea en forma modificada. Designan a su versión como la interpretación de las historias múltiples, para recalcar que se trata de "potencialidades" más que de realidades físicas. Se dice que Gell-Mann ha predicho el predominio de este punto de vista a finales de siglo.

David Z. Albert, físico metido a filósofo, de la Universidad de Columbia, y Barry Loewer, filósofo de origen, de la de Rutgers, proponen una sugerente alternativa. Según ella, cada observador, o "sistema físico sentiente", está asociado a un conjunto infinito de mentes, que experimentan los distintos resultados posibles de cualquier medida cuántica. El conjunto de elecciones incluidas en

la ecuación de Schrödinger corresponde a la miríada de experiencias tenidas por estas mentes y no a una infinitud de universos. Es natural que se la designe, pues, como la teoría de las mentes múltiples. La idea puede parecer rebuscada, razona Albert, pero no es más radical que la teoría de mundos múltiples o que la propia interpretación de Copenhague.

El quid del bit

Hay pensadores que reclaman un cambio drástico de nuestras maneras de pensar. Cuando Einstein introdujo su teoría de la relatividad, "abandonamos las viejas ideas euclídeas de espacio y tiempo y ahora tenemos un concepto más general", hace notar el filósofo Jeffrey Bub, de la Universidad de Maryland. En su opinión, la teoría cuántica puede exigir una renovación parecida de nuestras ideas de racionalidad y lógica. La lógica booleana, que se basa en proposiciones del tipo o esto o lo otro, vale para un mundo en el que un átomo pasa a través de una rendija o de la otra, pero no de ambas. "La lógica mecánico-cuántica no es booleana", comenta. "Si se comprende esto, empieza a tener sentido." Aunque también reconoce que ninguno de los llamados sitemas lógicos cuánticos propuestos hasta la fecha resulta muy convincente.

Wheeler contempla un tipo distinto de cambio paradigmático. La lección más profunda de la mecánica cuántica, según él, es que, de alguna manera, los fenómenos físicos resultan definidos por las preguntas que planteamos. "En cierto sentido, es un universo participativo", afirma. Puede que la base de la realidad no sea el cuanto, que sigue siendo un fenómeno físico pese a su carácter elusivo, sino el bit, la respuesta a una pregunta de sí o no, la moneda básica de la computación y las comunicaciones. Para referirse a su idea, Wheeler habla de "el quid del bit" ("*the it from bit*").

Siguiendo esta orientación, se está intentando reformular la física cuántica en términos de la teoría de la información, desarrollada hace casi medio siglo para maximizar la cantidad de información transmitida por los canales de comunicación. Ya se ha encontrado que el principio de indeterminación de Heisenberg, la dualidad onda-corpúsculo y la no localidad pueden formularse de manera más potente en su contexto, según afirma un antiguo alumno de Wheeler, William K. Wootters, del Williams College.

Mientras tanto, otros teóricos que se mueven en la frontera surrealista de la teoría cuántica están conjurando experimentos mentales que desvelen la clave del enigma de una vez por todas. David Deutsch, de la Universidad de Oxford, piensa que debe ser posible, al menos en principio, construir un "ordenador cuántico" que logre la superposición de estados. Ha puesto de manifiesto que, si distintos estados superpuestos de un ordenador pudiesen trabajar al mismo tiempo en partes distintas de un problema, se lograría una especie de paralelismo cuántico que resolvería ciertos problemas más rápidamente que los ordenadores clásicos.

Dando un paso más, Albert ha ideado, con sólo una de sus mentes, un ordenador cuántico capaz de realizar ciertas medidas sobre sí mismo y su entorno. Tal "autómata cuántico" sería capaz de saber sobre sí mismo más de lo que cualquier observador externo podría saber jamás, e incluso más de lo que normalmente está permitido por el principio de indeterminación. Podría servir también como una especie de testigo ocular del mundo cuántico, resolviendo cuestiones del tipo de si la función de ondas colapsa realmente, por ejemplo. Albert reconoce que no tiene ni idea de cómo construir dicha máquina, pero sus cálculos indican que la ecuación de Schrödinger permite tal posibilidad.

Si esto no funciona, siempre queda la máquina del tiempo de Aharonov. Basada no sólo en la teoría cuántica, sino también en la relatividad general, es una esfera de gran masa que puede expandirse o contraerse rápidamente. La teoría de Einstein predice que, cuando se expanda y la gravedad se haga proporcionalmente más débil, el tiempo se acelerará para quien ocupe la esfera, mientras que se frenará cuando se contraiga. Si ambos, máquina y ocupante, pudiesen ponerse en una superposición de estados correspondientes a distintos tamaños y, por tanto, a distintas velocidades del tiempo, piensa Aharonov, podrían "filtrarse" hacia el futuro. El ocupante desembarcaría, pediría a los físicos de aquel entonces que le explicasen los misterios de la mecánica cuántica y retornaría al presente con las respuestas, suponiendo que las haya.

Hasta que esto suceda, como los ignorantes moradores de la caverna de Platón, hemos de limitarnos a contemplar las sombras de los cuantos moviéndose por sus paredes y a preguntarnos qué significan.

Ciencia y empresa

Tejidos curativos

Los bioingenieros reproducen tejidos del organismo

Desde finales del decenio de 1970, la biología celular, la química de proteínas y la bioingeniería se han esforzado por comprender mejor las maneras en que se agrupan y funcionan las células, proporcionando el marco para una tecnología multidisciplinaria conocida como ingeniería de tejidos. Ron Cohen, vicepresidente de asuntos médicos en Advanced Tissue Sciences (ATS) de La Jolla, California, compara su situación actual con la formación de una orquesta. Durante una docena de años, diversas gentes han estado estudiando un instrumento determinado; ahora se reúnen para interpretar a Mozart.

Son muchos los lugares en que se investiga sobre tejidos muy variados: piel, cartílagos, huesos, hígado, intestinos y ligamentos. La Universidad de Harvard, el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la Universidad de California en San Diego y la Universidad de Michigan se encuentran entre los más destacados promotores académicos. Entre las empresas privadas norteamericanas, ATS, que está a punto de adquirir Neomorphics, de Cambridge, Massachusetts, es la más avanzada en la puesta de productos en el mercado, seguida de Organogenesis y BioSurface Technology, ambas de Cambridge, LifeCell de The Woodlands, Tejas, y Skeletech de Cleveland, Ohio. Se espera que surjan más empresas parecidas.

"El problema de cualquier clase de cirugía reconstructiva es que nunca hay suficiente tejido para realizarla", indica Joseph P. Vacanti, director del programa de trasplante de hígado en el Hospital Infantil de Boston. Los cadáveres no pueden suministrar materia viviente; los tejidos animales sufren rechazo. Los cirujanos se ven obligados a cosechar lo que pueden de otras zonas del cuerpo del paciente y cubrir los huecos con piezas metálicas o de plástico, si es posible. Si se dispusiese de tejidos cultivados, podría curarse a niños nacidos con deformidades faciales graves o sin trozos importantes de intestino; los cirujanos podrían tratar a pacientes desfigurados por quemaduras, cánceres y accidentes traumáticos o a quienes sufren de articulaciones erosionadas por el uso, la artritis o la enfermedad.

Puede incluso que la ingeniería de tejidos ayude a aliviar algún día la crónica escasez de órganos trasplantables. Fue precisamente la dificultad de obtener hígados, que originaba el fallecimiento de jóvenes pacientes a su cargo, lo que le hizo pensar: "Si no podemos obtener los órganos, fabriquemos algunos." En 1986 comenzó a desarrollar con Robert Langer, ingeniero químico del MIT especializado en biomateriales para administración de fármacos, un modelo de tejido de hígado que, hoy en día, ha avanzado lo suficiente para prolongar tres meses la vida de una rata. Reconoce que hígados artificiales apropiados para su ensayo en seres humanos están todavía muy lejanos, pero Neomorphics, la pequeña empresa que financia a ambos investigadores, está creando tejidos menos complicados, como el cartilaginoso, que deberían poder conseguirse antes.

Langer y Vacanti no son los únicos investigadores de esta especialidad cuyos objetivos iniciales se han reorientado hacia otros más inmediatos. También ATS decidió dedicarse al cultivo de tejidos de amplia aplicación. La empresa se llamaba Marrow-Tech cuando se fundó en 1986 y pretendía cultivar médula tomada de las personas, mientras fuesen jóvenes y sanas, almacenándola para posible terapia genética posterior. Pero pronto se dieron cuenta sus directivos de que necesitaban poner antes en el mercado algún otro producto.

ATS comenzó con deliberada lentitud. Su primer producto, un sucedáneo de la piel llamado comercialmente Skin², fue lanzado al mercado en noviembre de 1990. Su propósito era medir la toxicidad de fármacos y cosméticos, sin que se le asignase la misión de proteger el cuerpo. Pero lo que se aprendió con los paquetes to-



CHARLES A. VACANTI exhibe orejas moldeadas con un polímero biodegradable, destinadas a servir de soporte para el cultivo de células cartilaginosas. Foto: Stanley Rowin.

xicológicos se incorporó a otro producto, similar a la piel, adecuado para las víctimas de quemaduras.

Dermagraft, tal es su nombre comercial, es una fina malla biodegradable sembrada de fibroblastos de la capa subsuperficial de la piel, la dermis. Esta piel artificial, que está siendo evaluada en 150 pacientes de doce centros de quemados, proporciona un substrato sano y viviente para la epidermis tomada de regiones no dañadas del cuerpo del paciente. Pretende evitar los profundos injertos cutáneos que ahora se cortan de la piel normal. Cohen piensa que Dermagraft pudiera sanar mejor que la piel adulta, pues la matriz de polímero está sembrada de células extraídas del prepucio de recién nacidos. El tejido fetal no deja cicatrices.

ATS está ensayando ya Dermagraft en las úlceras que salen en las piernas a causa de la mala circulación. Pronto se probará en otras clases de úlceras cutáneas, en las que el tejido subcutáneo dañado impide que las células epidérmicas normales emigren hacia la herida. Lo que se ha aprendido con la piel se aplica ahora a los cartílagos, otro tejido que el organismo no tiene capacidad para regenerar.

Charles A. Vacanti, hermano de Joseph, es anestesista de formación, pero últimamente se dedica a investigar los mecanismos del crecimiento de cartílagos y huesos. El repuesto óptimo para los cartílagos, sean de la barbilla, de las mejillas o de ligamentos de las articulaciones, es cartílago de la misma persona. Sobre la negra mesa de su laboratorio en el Hospital Infantil descansan orejas de polímero moldeado y discos listos para ser sembrados con varias clases de células. Vacanti está colaborando en la optimización de biomateriales para el cultivo de células con Linda G. Cima, profesora asociada del MIT, que antes estuvo en el laboratorio de Langer.

Una posible forma de proceder sería que el cirujano ortopédico, al hacer la investigación usual con un artroscopio, rascase algo de cartílago de una rodilla, por ejemplo. El tejido así obtenido se sometería después al efecto de una enzima para degradar la matriz que rodea las células cartilaginosas, llamadas condroblastos o condrocitas. Una vez liberadas, las células comienzan a multiplicarse. Si se les permite adherirse a un polímero poroso que se degrade mientras ellas crecen, se las anima a formar una matriz estructural propia.

Según Vacanti, "si se pone la cantidad conveniente de células sobre un soporte estructural adecuado, se obtiene cartílago nuevo que es igual que el auténtico". La composición química y la apariencia del producto de laboratorio que muestra son virtualmente idénticas al cartílago recién extraído del hombro de una vaca. Queda todavía por determinar su comportamiento en el organismo.

El soporte más eficaz de los usados hasta ahora para cultivar cartílagos es una masa esponjosa de fibras de polímero que tiene el aspecto de una bola de algodón cardado. En rodillas de conejos cuyo cartílago articular se había extraído, el polímero permitió la regeneración del 80 por ciento del tejido, éxito que, como se enorgullece Vacanti, nunca se había conseguido antes sin presencia de un medio que contuviera las células para evitar su dispersión. Cree que los resultados hubiesen sido todavía mejores si hubiera dado más tiempo a las células para crecer en la matriz antes de implantarla.

Uno de los factores más importantes en la creación de tejidos sucedáneos es la velocidad a la que se disuelven los polímeros que soportan las células. Lo ideal sería que la matriz se degradase a medida que crecen éstas y forman masas organizadas. Para conseguirlo, Langer y sus colaboradores Antonio Micos y Denise Barrera están haciendo variar las cantidades de ingredientes de biomateriales como el ácido glicólico poliláctico (AGPL), que se usa para suturas y administración de fármacos.

La idea es conseguir que se desarrollen tantas células como sea posible en un soporte sintético, con una elevada proporción de superficie a volumen. De esta manera, el sucedáneo actúa desde el principio más o menos como el tejido normal, lo que origina una cicatrización más rápida. Empezaron utilizando hojas y láminas de polímero, pero esto no permite meter muchas células dentro. Luego pensaron en cómo resuelve el problema la naturaleza; la respuesta se puede ver en las algas, en los árboles, en los pulmones: usa una estructura tridimensional arborescente para crecer. Ahora se proponen hacer los polímeros siguiendo este modelo.

Langer cree que lo que aprenden los biólogos celulares redunda en beneficio de los ingenieros químicos, indicándoles lo que deben construir. Pone como ejemplo el reciente descubrimiento de unas moléculas adhesivas sobre la superficie de las células, que ayudan a las células vecinas a mantener sus estados diferenciados. Si pudieran ligarse a un polímero imitaciones de esas secuencias, podrían hacer que las células funcionasen como es debido. Puede que Barrera haya dado un paso importante en esa dirección al insertar en el AGPL un aminoácido que puede servir como punto de anclaje para otras moléculas. Si el nuevo polímero es reproducible, dice, "podríamos hacer injertos sobre cualquier cosa que los biólogos quisieran".

Los ingenieros de tejidos están entusiasmados con las posibilidades que intuyen para sus técnicas. Piensan que los cirujanos podrían emplear programas de fabricación ayudados por ordenador para producir soportes celulares sintéticos en el quirófano, o escoger formas premoldeadas, digamos orejas o alvéolos, o triángulos que se apilasen para formar una nariz. Los polímeros podrían administrar factores de crecimiento a medida que se degraden, lo que estimularía la división de las células en los momentos críticos.

Vigilante

Una retina electrónica supervisa cheques

La razón fundamental de que ni las tiendas, pequeñas o grandes, ni los propios bancos se fíen mucho de los cheques es que algunos de ellos valen menos que el papel en el que están impresos. Una sencilla solución sería un dispositivo que, como los que aprueban las compras realizadas mediante tarjetas de crédito, identificase la cuenta gracias a la información contenida en el cheque y automáticamente llamara a una base de datos para comprobar el saldo. Pero las lectoras corrientes de cheques magnéticos tienen dificultades para identificar los números de cuenta porque los consumidores marcan y mutilan los documentos con toda tranquilidad. El resultado es que sólo unos pocos detallistas usan este método.

Un enfoque distinto es el propuesto por dos pioneros del microcircuito, Carver Mead, del Instituto de Tecnología de California, y Federico Faggin, que ayudó a proyectar el primer microprocesador en los años setenta, cuando estaba en Intel. Su invención, realizada junto con Tim Allen, antiguo alumno de Mead, consiste en un nuevo tipo de sensor de imagen que, unido a la circuitería pertinente, imita las funciones de la retina humana y del córtex visual. Mead y Faggin dicen que este producto es la primera aplicación comercial que corporeíza una de las llamadas redes neurales en una pastilla. La mayor parte de las existentes hasta la fecha se han rea-



Carver Mead y Federico Faggin, pioneros de la microelectrónica, comercializan un circuito de red neural. Foto: Fran Ortiz/San Francisco Examiner.

lizado en forma de programa, dada la necesidad de hacer frecuentes alteraciones en los elementos procesadores y también por la falta de métodos para proyectar estos circuitos analógicos especializados.

El componente I-1000 será fabricado por Synaptics, compañía fundada por Mead y Faggin en 1986. Synaptics desarrolló la pastilla para una lectora de cheques fabricada por VeriFone, una firma de Redwood City, California, que domina el 64 por ciento del mercado de las máquinas de verificación de tarjetas de crédito usadas por los detallistas. Responsables de ambas compañías esperan que el precio promedio de la nueva lectora de cheques, unos 250 dólares, mucho menos que las actuales, sea lo suficientemente bajo para garantizar su aceptación por parte de los pequeños comerciantes. Esta clase de máquina podría emplearse con el tiempo para cargar automáticamente la compra a la cuenta de un cliente.

No existen técnicas de proyecto establecidas que permitan combinar miles de transistores analógicos para que procesen datos todos al mismo tiempo. Synaptics optó por reducir el riesgo del proyecto mezclando elementos de circuito nuevos con los métodos modulares propugnados por Mead en su clásico texto sobre circuitos integrados. Esto permitió a la compañía elaborar una pastilla pequeña y barata, que puede fabricarse en la mayoría de las plantas de manufactura de semiconductores. Faggin cree que éste es un camino que podría conducir al uso en gran escala de redes neurales.

El dispositivo utiliza una "retina de silicio", un circuito sensor que se ha modelado para funcionar como los conos de la retina. Como ella, afirman Mead y Faggin, el dispositivo responde bien incluso con niveles de luz variables, diferencias en la densidad de la tinta y otras clases de ruido ambiental. Los fotodetectores de otras lectoras ópticas no pueden adaptarse a niveles de luz que pueden variar a lo largo de la imagen, lo que genera errores en la identificación de los códigos bancario y de cuenta contenidos en el cheque.

La imagen formada por los receptores de la retina de silicio (una versión más sencilla de la descrita en el número de julio de 1991 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA) se transmite a dos redes neurales situadas en el mismo sustrato. Como le sucede al córtex visual, esas redes se pueden "adiestrar" para percibir sutiles diferencias entre objetos parecidos, digamos las cifras 3 y 8. Una de las redes localiza el carácter, la otra lo identifica.

La circuitería de identificación consta de 14 "neuronas", una para cada uno de los caracteres y números del código que tiene el cheque. A su vez, cada neurona consta de 400 transistores interconectados, que son el equivalente de las sinapsis del cerebro, cada uno de los cuales recibe para su proceso uno de los 400 elementos que forman la imagen captada por la retina. Las señales de salida de cada transistor —el producto del brillo de cada elemento de la imagen por un valor específico (un "peso sináptico") del transistor— se suman. La neurona que tiene la señal acumulada más intensa "gana".

A semejanza del sistema visual humano, la red neural permite una identificación prácticamente instantánea. Las 14 neuronas procesan al mismo tiempo la imagen captada, operación en la que no invierten más de un microsegundo. Y, continuando con la analogía, se puede procesar una imagen incompleta. Siempre que la señal de una neurona alcance un umbral preprogramado, se identifica el carácter. Un número de cheque que haya sido tapado con tinta producirá una señal más débil, pero puede que suficiente para su identificación. Un microprocesador digital corriente prepara después los datos del cheque, que son enviados al banco para su verificación por un enlace de telecomunicación.

Las lectoras magnéticas a que ahora tienen acceso los detallistas ocasionan muchos errores si el cheque está mal escrito o deteriorado, lo que las ha confinado a la trastienda de los bancos. Allí disponen de onerosos equipos de inspección, que combinan sensores ópticos (dispositivos de carga acoplada) y magnéticos, normalmente conectados a ordenadores procesadores de señal y después a otros grandes ordenadores, que son los que efectúan las transacciones contables.

Synaptics optó por una aplicación sencilla en lugar de proponerse un problema más ambicioso, como sería tratar de construir un elemento de visión para un robot. Faggin cree que es mejor ir paso a paso; por eso proyectó el primer microprocesador para una calculadora de sobremesa y no para un superordenador.

La compañía está estudiando un componente que pueda identificar falsificaciones y monedas de diferentes países. Otro de los que están sobre la mesa tendrá la misión, aparentemente sencilla, de ayudar a discernir las direcciones escritas en los sobres. Los servicios postales de todos los países podrían ser clientes ansiosos: más del 40 por ciento de las cartas que pasan a través de sus lectores automáticos de direcciones no pueden ser procesadas por las máquinas.

Diagnóstico ominoso

Una proteína precursora puede predecir el riesgo de enfermedad de Alzheimer

Mientras no exista cura, ¿de verdad puede desear alguien saber si algún día tendrá la enfermedad de Alzheimer? Los científicos de SIBIA, empresa derivada del Instituto Salk de Biotecnología de La Jolla, California, trabajan sobre la base de que la respuesta es afirmativa. Se están preparando para comercializar la primera prueba diagnóstica predictiva de la debilitadora y fatal enfermedad.

En el momento presente, el diagnóstico seguro de esta enfermedad sólo puede hacerse *a posteriori*: la autopsia revela que el cerebro tiene placas características, lesiones, de proteína beta-amiloide. La prueba de SIBIA, por el contrario, puede resultar positiva antes de que aparezcan los síntomas irreversibles. También puede distinguir la enfermedad de Alzheimer de otras clases de demencia, lo que debería ayudar a definir el tratamiento, y podría usarse para vigilar la respuesta de los pacientes a fármacos experimentales, así como el progreso de la enfermedad.

La prueba, que requiere la extracción de líquido cefalorraquídeo, usa un anticuerpo monoclonal muy específico para valorar los niveles de precursor de la proteína beta-amiloide (PPA), substancia que da lugar a las placas proteínicas halladas en el cerebro de las víctimas de Alzheimer. SIBIA y quienes colaboran con ella han publicado recientemente cierto número de trabajos en los *Proceedings of the National Academy of Sciences, Annals of Neurology* y *The Lancet*. Todos los artículos llegan a la conclusión de que la enfermedad de Alzheimer está relacionada con niveles reducidos de PPA. "Esto no es solamente un indicador biológico. Es la proteína que desempeña un papel crítico en la enfermedad", dice William E. Van Nostrand, que desarrolló el anticuerpo con Steven L. Wagner en la Universidad de California en Irvine (U.C.I.).

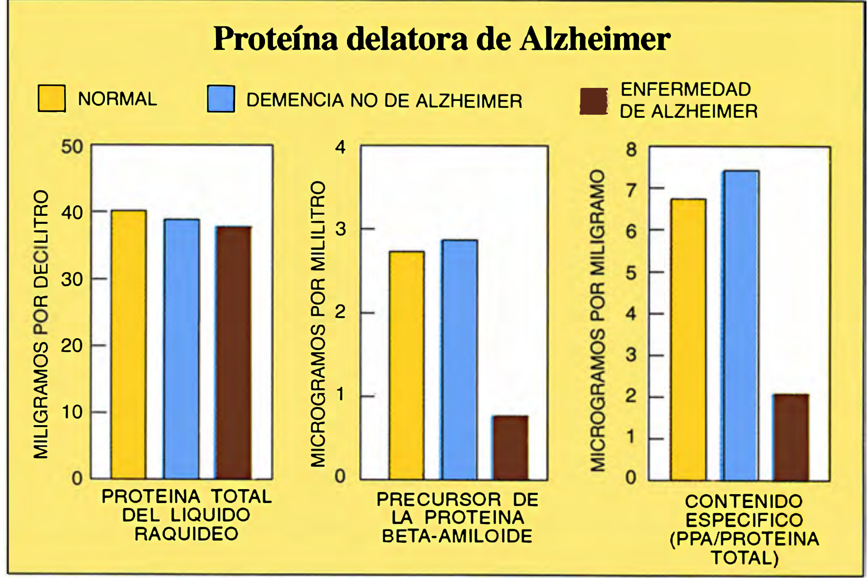
Científicos de la U.C.I. y sus colegas del Hospital de la Universidad Libre de Amsterdam, Holanda, emplearon la prueba del anticuerpo para valorar los niveles de PPA en 16 pacientes sanos, 13 probables pacientes de Alzheimer y otros 18 con demencias no relacionadas con ésta. Los niveles de PPA en los casos de Alzheimer fueron unas 3,5 veces más bajos que en los restantes. Los investigadores mantienen que sus resultados indican un procesado anormal de la proteína, que forma depósitos amiloides. (La asociación no aclara nada respecto de la cuestión que sigue debatiéndose: si la amiloide causa la enfermedad de Alzheimer o es el resultado de ella.)

Hay otras investigaciones que también demuestran una correlación entre la enfermedad y los niveles reducidos de PPA. Por ejemplo, en un estudio que la compañía llevó a cabo en la Universidad de California, en Los Angeles, "conseguimos identificar a un individuo gravemente afectado antes de que presentase síntomas", dice Wagner. En el Centro Francés John Douglas en Los Alamitos, California, se extrajo líquido raquideo a cuatro pacientes antes de tomar un fármaco experimental; sus niveles de PPA eran 2,4, 2,3, 1,4 y 0,1 microgramos por mililitro. "El de lectura más baja era el que presentaba mejor estado de salud cuando comenzó la prueba", recuerda Wagner. "Ahora es el más gravemente afectado".

La compañía ha realizado incluso alguna labor detectivesca postmortem para confirmar el papel de la proteína. "Echamos la vista atrás y examinamos líquido raquídeo extraído de pacientes entre tres y seis años antes de que la autopsia confirmara que padecían la enfermedad de Alzheimer", explica Wagner. Pocos centros se habían tomado la molestia de guardarlo, pero el Hospital del Monte Sinaí, en el Bronx neoyorquino, y la Universidad de Washington pudieron recuperar algunas muestras del congelador. SIBIA las analizó y los centros compararon sus resultados con los informes patológicos. Los niveles más bajos de PPA pertenecían a los pacientes que tenían los niveles más altos de placas amiloides en sus cerebros, sobre todo en los vasos sanguíneos. "Creemos que esta lesión concreta puede tener la correlación más espectacular con nuestra prueba", dice Van Nostrand, que es ahora consultor de SIBIA.

SIBIA planea lanzar al mercado una versión comercial de la prueba hacia finales del próximo año, de momento a través de los centros especializados en enfermedad de Alzheimer, algunos de los cuales ya la están evaluando. No es probable que esta prueba se aplique nunca en los consultorios médicos, pero sin duda se realizará en los hospitales. Las tomas de líquido cefalorraquídeo son mucho más frecuentes de lo que se cree, pues se hacen para determinar si los pacientes sometidos a exámenes neurológicos tienen esclerosis múltiple, infecciones o algún tipo de trastorno autoinmune.

No hay ninguna indicación del precio que tendrá. Su valor es grande, sobre todo en términos de lo que ahora se precisa para obtener un resultado por otros medios. Mientras tanto, SIBIA proyecta usarla para evaluar un fármaco que la propia empresa está preparando contra la enfermedad de Alzheimer. Sería más conveniente que pudiera diagnosticársela con un simple análisis de sangre, pero esto es improbable, porque la dolencia está confinada al sistema nervioso central. A pesar de sus limitaciones, de momento no hay nada mejor que esta nueva posibilidad.



FUENTE: *SIBIA*

Taller y laboratorio

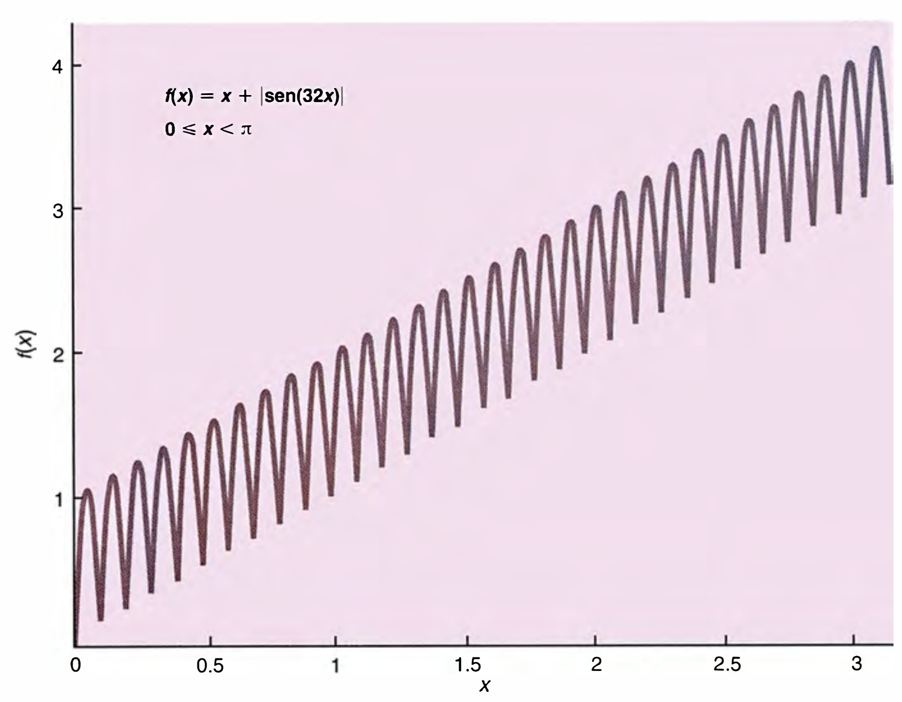
Rick L. Riolo

Los bits mejor dotados

Según Darwin, la vida es un campo de batalla en el que sólo los mejor dotados sobreviven y se reproducen. Esto, que ha resultado tan provechoso para la vida, es también beneficioso para la resolución de problemas con ordenador. En concreto, los programas que hacen uso de los llamados algoritmos genéticos solucionan problemas basándose en los mecanismos de la selección natural. Estos algoritmos empiezan proponiendo algunas soluciones posibles. Luego, al modo de organismos biológicos, esas soluciones "se entrecruzan", o intercambian "genes", en generaciones sucesivas. A veces se dan mutaciones, o cambios en los genes. Unicamente las soluciones "más aptas" sobrevivirán y se reproducirán para generar soluciones aún mejores (véase *"Algoritmos genéticos"*, por John Holland, en este mismo número).

Una forma de entender cómo trabajan los algoritmos genéticos es montar uno sencillo y hacer prácticas con él. Yo lo redacté en el lenguaje de programación C, pero cualquier otro me hubiera servido igual. Tardé unos dos días en completar la versión aquí descrita. Como es habitual, lo que me llevó más tiempo fue escribir las rutinas encargadas de hacerlo de uso agradable, de cambiar los valores de los parámetros y de mostrar en la pantalla las poblaciones y la información estadística sobre su eficacia.

Mi recomendación para quien quiera desarrollar un algoritmo genético es que lo haga en dos fases. Primero, se redactan subprogramas auxiliares para seguir la pista a la aptitud media de la población y a los miembros más aptos de cada generación (luego se describen algunas de ellas). Hay que generar poblaciones aleatorias de individuos y disponer de subrutinas que les asignen un grado de aptitud. El programa debería también mostrar en la pantalla a los individuos, sus aptitudes, clasificarlos por la aptitud y calcular la aptitud media de la población. En la segunda fase se añaden las subrutinas que constituyen el algoritmo propiamente dicho, es decir, las encargadas de seleccionar progenitores entre la población actual y modificar su descendencia mediante cruces y mutaciones.



LA SOLUCION MAS APTA de f(x) = x + |*sen*(32x)| *es el valor de* x *que maximiza* f(x). *La solución es* x = *3,09346401 (en radianes), representada por 1111110000010100.*

Al escribir un algoritmo genético por primera vez, lo mejor es emplear un problema cuya solución ya se conozca, ya que así se facilita su depuración y comprensión. Luego no resultará demasiado difícil adaptarlo a problemas más complejos.

Me decidí por el problema de hallar el valor óptimo de la función $f(x) = x + |\mathrm{sen}(32x)|$. Los valores de x (el llamado dominio) los acoté entre 0 y π. Así pues, la función representa 32 oscilaciones uniformemente repartidas que se suman a la recta $f(x) = x$ (*véase la figura 1*). Como $f(x)$ es siempre positiva, podemos emplearla sin más como medida de la aptitud. El objetivo es encontrar la cadena (el valor de x) que dé la mayor $f(x)$.

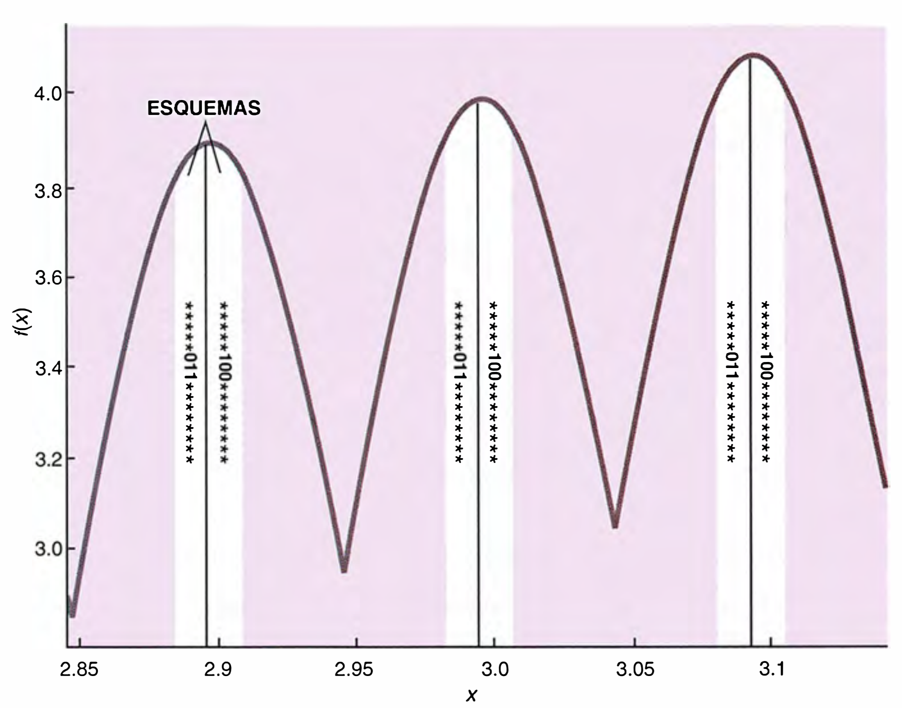
El primer paso es decidir cómo representar las estructuras del dominio para que nuestro algoritmo genético sea capaz de procesarlas. Los valores de x los representé como ristras binarias, en la forma descrita en el artículo de Holland. Para mis primeros experimentos, las hice de 16 bits de longitud ($L = 16$). Tenemos así $2^L = 2^{16} = 65.536$ valores posibles de x. (Aumentando la longitud de la cadena se mejora la precisión de la solución.) Esas 2^L ristras posibles las asigné a los valores de x, de modo que la cadena 0000000000000000 representase $x = 0$, 0000000000000001 fuese $x = 1(\pi/2^L)$, 0000000000000010 fuese $x = 2(\pi/2^L)$ y así sucesivamente hasta 1111111111111111, que representa el valor máximo del dominio: $x = (2^L - 1)(\pi/2^L) = \pi - \pi/2^L$. (El valor de π propiamente dicho está excluido, porque no queda cadena que lo represente.) Compruebe el lector su intuición: ¿qué valor de x representa la cadena 1000000000000000?

En resumen, las cadenas binarias representan 2^L valores de x uniformemente espaciados entre 0 y π. Por consiguiente, cuando el algoritmo explora el espacio de cadenas binarias, lo que realmente explora son los valores posibles de x. Un fragmento en lenguaje C de los ofrecidos en el recuadro (algoritmo de asignación) muestra una manera de realizar tal representación, estando almacenada

la cadena en C como vector de caracteres (`char array`). Por ejemplo, 1000000000000000 se hará corresponder con $\pi/2$ (aproximadamente). La aptitud de cada cadena binaria S es precisamente $f(x)$, siendo x = MapStringToX(S).

Dada esta asignación de las cadenas binarias al dominio de $f(x)$, es instructivo representar los esquemas, o regiones diana, en la forma indicada por Holland. Por ejemplo, el esquema 0*************** se compone de todas las cadenas que empiezan con 0. El asterisco (*) es el símbolo de posición "indiferente": no importa que se trate de 0 o de 1. El esquema 0*************** se asigna a la primera mitad del dominio; o sea, entre 0 y $\pi/2$. El esquema 1*************** corresponde a la otra mitad, entre $\pi/2$ y π. En el caso de la función $f(x)$, su valor medio sobre 1*************** es mayor que sobre 0***************. Es decir, en una población de cadenas aleatoria, deberemos encontrar que la aptitud media de los individuos de la primera región es mayor que la de los miembros de la segunda.

Mi programa incluye subrutinas que rastrean a los individuos de cualesquiera esquemas especificados por el usuario (por ejemplo, todas las cadenas que empiecen con 1 o todas las que acaben en 001). A cada generación, el programa recuenta el número de individuos de la población que sean miembros de cada región. Calcula también la aptitud media de esos individuos, estimando así explícitamente la de las regiones.



DOS ESQUEMAS ocupan las regiones centrales de cada máximo de f(x). *Los puntos de máxima aptitud pertenecen a ellos. La ilustración sólo recoge los tres últimos máximos.*

El lector puede desarrollar más su comprensión del tema si trata de representar por su cuenta otros esquemas en el dominio x y analiza a los individuos aleatorios que caigan en esas regiones. ¿Podría especificar los esquemas que dividen cada oscilación de $f(x)$ en ocho regiones contiguas? ¿Cuál es la aptitud media de los individuos de cada una de ellas?

Una vez nos hayamos asegurado de que esta primera parte del programa funciona, añadiremos las subrutinas que constituyen el núcleo del algoritmo genético. El empleado por mí aparece en el recuadro.

La subrutina EvaluatePopulation se limita a repasar todos los individuos de la población y asignar a cada uno un valor $f(x)$ como medida de su aptitud. La subrutina DoTournamentSelection dirige una serie de confrontaciones entre individuos elegidos al azar y habitualmente, pero no siempre, copia en NewPop al más apto de la pareja (i, j). El recuadro contiene un ejemplo de algoritmo de selección por torneo. En él, la función URand01 retorna un valor aleatorio (uniformemente distribuido) entre 0 y 1. El efecto neto es que los individuos relativamente más aptos tienden a tener más progenie en la nueva población que los menos aptos. También puede resultar interesante que, además de ello y con cada generación, se copie el individuo más apto en las nuevas poblaciones.

Obsérvese que si URand01 es mayor que 0,75, la presión selectiva será superior (a las cadenas menos aptas les será más difícil ser copiadas en NewPop), mientras que un valor más pequeño dará una presión selectiva menor. Si se emplea 0,5, no habrá presión alguna.

La subrutina ModifyPopulation debe ejecutar al azar la operación de cruce sobre algunas de las parejas de NewPop; una tasa de cruce típica es 0,75 (o sea, se cruzan un 75 por ciento de las parejas). Por mi parte, empleé la operación de cruce de "punto único" que describe Holland en su artículo. Mi programa también incluye la mutación, que afecta a un número reducido de bits de cada cadena, elegidos al azar, cuyo valor se permuta (de 0 a 1 o al revés). Una tasa de mutación típica es de 0,005 por bit; dicho de otro modo, cada bit tiene una probabilidad de 0,005 de resultar mutado.

Una vez terminada la realización del programa, podremos empezar a realizar experimentos. Probemos a ejecutarlo con una población aleatoria de 200 individuos y dejémoslo en marcha durante 50 generaciones; recojamos estadísticas acerca de la evolución de la aptitud media y observemos cuál es la aptitud individual máxima en cada generación. Podemos comparar los resultados obtenidos con tamaños de población y tasas de cruce y mutación diferentes. En lo que a mí respecta, me pareció que lo mejor era comparar los resultados de varias pasadas, iniciadas con "simientes" distintas del generador de números aleatorios.

Un experimento que resulta muy útil para entender la dinámica de la evolución de las poblaciones es seguir la pista de los individuos de las ocho regiones en que se dividen las oscilaciones $f(x)$, antes mencionadas. Las regiones están definidas por los esquemas *****000********, *****001********, y así sucesivamente hasta *****111********. Adviértase que *****011******** y *****100******** ocupan el centro de cada cresta, que incluye los puntos de máxima aptitud.

En una población inicialmente aleatoria, cada uno de los ocho esquemas debe contener el mismo número de individuos aproximadamente. Conforme actúa el algoritmo genético, veremos que, por término medio, hay más individuos en los esquemas centrales que en los otros seis. Esto acontece pese a que mu-

Fragmentos de programación

ALGORITMO DE ASIGNACION. Permite que las cadenas binarias representen valores de *x*. (Nota: el compilador define M_PI como π.)

```
double scalefactor = (double) M_PI/pow((double) 2.0, (double) L);
double MapStringToX(char *S)
{ /* Poner los bits de S en el extremo derecho de r y desplazarlos
        hacia la izquierda */
  int i, r;
  for (i = r = 0; i < L; ++i, ++S) {
    r << = 1;  /* desplazar hacia la izquierda, bit de la derecha a 0 */
    if (*S == ‘1’) /* si S tiene un 1, */
      ++r;        /* poner el bit de la derecha a 1 */
  }
  return ((double) r * scalefactor);
}
```

ALGORITMO GENETICO BASICO. Ejecuta repetidamente operaciones de cruzamiento, mutación y selección.

```
/* Crear la estructura para almacenar las poblaciones */
struct PopStr {
   char Genome[L+1]; double Fitness;
} Pop[PopSize], NewPop[PopSize];
/* ejecutar el algoritmo */
GenerateRandomPopulation(Pop);
EvaluatePopulation(Pop);
while  (Not_Done) {
   DoTournamentSelection(Pop, NewPop);
   ModifyPopulation(NewPop);
   Switch(Pop, NewPop);
   EvaluatePopulation(Pop);
}
```

ALGORITMO DE SELECCION POR TORNEO. Escoge los individuos más aptos y los copia en la generación siguiente.

```
while (NewPopNotFull) {
   /* elegir al azar dos individuos de Pop */
   i = random()%PopSize; j = random()%PopSize;
   /* obtener un valor aleatorio entre 0 y 1 */
   if (URand01() <0.75)
      /* copiar el más apto de Pop[i], Pop[j] en NewPop */
   else
      /* copiar el menos apto de Pop[i], Pop[j] en NewPop */
}
```

chos de sus miembros tengan asignados valores pequeños de *x* y posean, por tanto, una aptitud baja. La razón es que la aptitud media de los esquemas centrales es mayor que la de los otros.

Con esos ocho esquemas, intenté rastrear la habilidad del algoritmo en la búsqueda de los individuos de aptitud superior. Preparé el programa para que, a cada generación, registrara el número de individuos pertenecientes a cada esquema, su aptitud media y la aptitud media del conjunto de la población. Los teoremas aludidos en el artículo de Holland predicen que debe aumentar el número de individuos contenidos en las regiones cuya aptitud media estimada sea superior a la media de la población, mientras que debe disminuir en aquellas cuya aptitud sea inferior a la media.

Con una población de 400, una tasa de cruce de 0,75 y una tasa de mutación de 0,001, el programa confirmó las predicciones en torno al 67 por ciento de las veces. Me di cuenta de que cuanto mayores eran las tasas de cruzamiento y mutación y menor el tamaño de la población, menor era la frecuencia con que se confirmaban las predicciones. Estos resultados creo que son lógicos, porque unas tasas de cruce y mutación elevadas trastornan y desbaratan más a menudo los "módulos" o "bloques constructivos" (esquemas) de calidad, mientras que, para poblaciones más reducidas, los errores de muestreo tienden a deslucir las predicciones.

Una vez que hayamos dejado actuar al algoritmo durante muchas generaciones, es probable que observemos que la mayoría de la población se compone de cadenas muy parecidas entre sí, si no iguales. Esto se llama convergencia y se debe a que el algoritmo genético empuja a la población hacia regiones diana cada vez más estrechas. No es infrecuente que la población converja hacia un individuo que no sea el óptimo. Lo que sucede en este caso es que el algoritmo se ha atascado en un óptimo local. La convergencia puede tener efectos muy debilitadores, pues implica que los cruces no contribuyan mucho a la busca de individuos mejores. El cruce de dos cadenas iguales da como resultado las dos mismas ristras y no ocurre nada nuevo.

Se trabaja con intensidad en la búsqueda de procedimientos que eviten convergencias inconvenientes. Uno de los posibles mecanismos que se investigan consiste en polarizar el proceso de selección para que preserve la diversidad de la población. Su rasgo fundamental consiste en incitar a los individuos a que ocupen muchas regiones diferentes del dominio, proporcionalmente a su valor medio asociado, un poco como las distintas especies ocupan sus nichos gracias a la evolución natural.

Desde luego, el algoritmo genético puede aplicarse a problemas diferentes de la optimización de funciones. Me llevó unas cuatro horas modificar mi programa lo necesario para crear otra versión, en la que los individuos representan estrategias para jugar a una forma del llamado "dilema del preso". En este juego, dos presos se enfrentan, por separado, a una opción: o colaboran con el otro (no diciendo nada del delito) y cada uno recibe una sentencia de tres años, o bien tratan de librarse "cantando", es decir, confiesan la verdad. Pero, por desgracia para cada uno de ellos, ninguno sabe lo que hará el otro: si uno coopera y el otro se chiva, al primero lo condenan a diez años y al segundo lo liberan. Si confiesan los dos, ambos son condenados a siete años.

Con mi algoritmo genético modificado exploré las estrategias aplicadas al jugar muchas veces con el mismo oponente. Cada cadena binaria de un jugador consta de dos números (p, q), siendo p la probabilidad de que coopere si el oponente cooperó en el juego anterior y q la de que coopere

si el otro le traicionó. Por ejemplo, la estrategia (1, 0) es el toma y daca y (0,1, 0,1) es aproximadamente el planteamiento de "traicionar siempre".

El algoritmo genético genera algunas tendencias muy interesantes en la evolución de conjuntos de tales estrategias, sobre todo si la cadena binaria contiene también algunos bits que funcionen como "etiqueta" o identificador arbitrario. Otro grupo de bits podría entonces indicar la propensión del individuo a jugar sólo con quienes posean una etiqueta similar en su cadena. Efectivamente, la población puede desarrollar individuos que reconozcan "señales" externas (etiquetas) asociadas con jugadores de toma y daca. Esto les permitiría sacar ventaja buscando individuos cooperativos y evitando a los traidores.

De estructuras genéticas relativamente sencillas puede surgir una dinámica evolutiva complicada. Por ejemplo, es posible que la evolución origine mimetismo y otras formas de engaño, que aparezcan traidores con etiqueta de cooperadores. Si le pone un poco de imaginación, usted mismo puede construir otras estructuras genéticas simples y emplear el algoritmo genético para hacerles producir procesos evolutivos complejos gracias a su ordenador.

Los lectores que deseen obtener una copia del programa de optimización (tanto fuente como ejecutable) a que se refiere el autor, deberán enviar un disco de 3,5 o de 5 1/4 pulgadas vacío (formato MS-DOS únicamente) junto con un sobre de retorno, franqueado y con sus señas, a Prensa Científica, Taller y laboratorio, Viladomat, 291, 6.º, 1.ª, 08029 Barcelona. El disco les será devuelto con el programa grabado. Como se menciona en el texto, la fuente está escrita en lenguaje C. Tiene abundantes comentarios, en inglés.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A COMPARATIVE ANALYSIS OF SELECTION SCHEMES USED IN GENETIC ALGORITHMS. David E. Goldberg y Kalyanmoy Deb en *Foundations of Genetic Algorithms*. Dirigido por Gregory J. E. Rawlins. Morgan Kaufmann, 1991.

HANDBOOK OF GENETIC ALGORITHMS. Dirigido por Lawrence Davis. Van Nostrand Reinhold, 1991.

TIT FOR TAT IN HETEROGENEOUS POPULATIONS. Martin A. Nowak y Karl Sigmund en *Nature*, vol. 355, n.º 6357, págs. 250-253; 16 de enero de 1992.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Dameros y dominós

“El negocio no marcha”, rezongó Roque Cascarrocas.

“Ya puede decirlo, jefe”, convino Abel Hisco, su ayudante.

“El negocio no marcha.” El señor Cascarrocas, director general de Concesionaria de Obeliscos Públicos (CODOP), propendía a recalcar cuanto decía. “Como no nos hagan pronto algún pedido tendré que colgar los cinceles e ir de porquerizo con mi tío Trotacochinos, que está empeñado en que vuelva con él al pueblo.”

Abel arrancó perezosamente unas esquirlas a un menhir de juguete. “Es la recesión, señor Roque. Nadie vende un clavo. El mercado de crómlechs y circos pétreos ha tocado fondo... rocoso; hasta los hipogeos están hipotecados. El otro día oí a Moloch Molóchez quejarse de que los diezmos vuelven a ser menores y que los hierofantes a duras penas consiguen comprar carneros suficientes para aplacar a P'lete, dios de las nieves, antes de que llegue el invierno.”

Roque rascóse sus amplias narices, flexionó desperezándose sus enormes bíceps y preguntó: “¿Me has traído el número de *Piedra rodante* que te encargué?” Abel hizo rodar hacia su jefe un gran disco circular de piedra caliza. Roque lo recogió, examinando pensativo las inscripciones cinceladas en él. “Bueno, tal vez haya algo en los anuncios por palabras... Vamos a ver... ‘Se necesita sustituto de domador de renacuajos...’ ‘Jubilación del Inspector Jefe de control de sabandijas de Madri-Higuera...’ ‘... siete vírgenes, trabajo fácil, dispuestas a viajar...’ ¡Hombre! ¡Una oferta de subcontrata de obras de remodelación de la plaza del mercado en Hipervilla! ¡Abel, acércate allá y averigua qué pretenden hacer, mientras yo repaso las correas de los mazos y los martillos de retoque!”

Un par de días después, regresaba Abel.

“Bueno, cuenta.”

“Verá, señor Roque. La plaza del mercado de Hipervilla está pavimentada con grandes losas cuadradas de piedra. Hay 64, de unos tres metros de lado cada una, que forman un cuadrado de ocho por ocho losas. Las originales están casi todas cuarteadas. El municipio quiere levantarlas todas y reemplazarlas.”

“¡Fantástico!”

“Espere, espere, que hay pegas. La principal es que esta vez no quieren losas cuadradas. La clerecía local considera que ésa ha sido la causa de que la piedra se agrietase.”

“¡Bobadas! Característico de la clerecía, preocupada siempre por las formas y por intelectualismos numerosóficos... Yo te diré exactamente lo que pasó: usaron losas de desecho y el agua infiltrada, al congelarse, hizo saltar la piedra.”

“Los clérigos dicen que se rompieron porque el cuadrado es símbolo de Gelos, el demonio de las heladas.”

“¿De veras? Yo creía que era el de Crujecolmillos, el ogro cavernícola.”

“Y lo es”, admitió Abel. “Pero, aparte de que no hay tantos símbolos para elegir, podría decirse que el cuadrado es bastante popular. Crujecolmillos lo comparte con Gelos; suelen alternárselo a lo largo de la semana.”

“¡Ah! Puede que los sacerdotes tengan razón.”

“Depende de que la helada se produzca en martes o no. Pero, con o sin razón, no conviene discutir con ellos, sobre todo si les tienes cariño a tus vísceras. De losas cuadradas, ni hablar. Quieren dominós.”

Cascarrocas se le quedó mirando como a un bicho raro. “Abel, en nombre de Bog, dios de los pantanos, ¿qué es un dominó?”

“Son dos cuadrados adosados, señor Roque.”

“¿Y por qué no lo dicen claramente? Si lo que quieren son bimaclas, ¡que lo digan! ¿A qué viene esa tontería de ‘dominó’?”

“¡Y yo qué sé! Pero, jefe, mire, puede haber dificultades. A lo mejor los dominós no casan bien.”

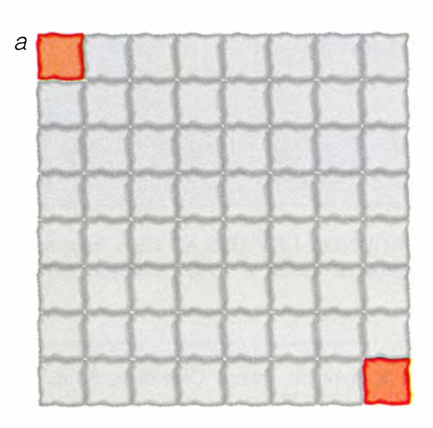
“¡Pues claro que casan! Lo único que hay que hacer es poner uno donde antes iban dos cuadrados.”

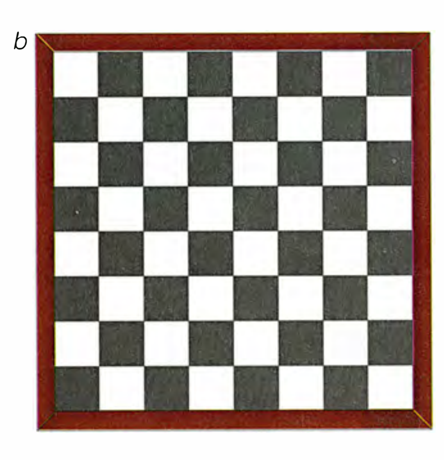
Abel frunció el ceño. “Sí, pero eso sólo funciona si el número total de cuadrados es par. Cada dominó cubre dos cuadrados. Si se empezase con un número impar, al final quedaría un cuadrado sobrante.”

Roque suspiró resignado. “Pero, Abel, me has dicho que había 64 cuadrados. ¡Ese número es par!”

“¿De veras?”

“Sí, con tal de que las losas hayan sido colocadas horizontalmente. La plaza del mercado es par.”







1. Una matriz de ocho casillas de lado, de la que se han suprimido dos vértices diagonalmente opuestos (a). *¿Es posible recubrirla con 31 piezas de dominó? Al colorear los cuadros, convirtiéndola en damero, se ve que hay 32 cuadros negros y 30 blancos. Como cada dominó recubre un cuadro de cada color, forzosamente quedarán dos cuadros negros descubiertos.*

"¡Ah, ya! Supongo que debí haber mencionado las estatuas de Gog y Magog."

Cascarrocas se incorporó furibundo. "¿Estatuas? ¿Con qué me sales ahora?"

"Cuando se fracturó la primera losa, para ocultar la grieta pusieron encima una estatua de Gog. Al poco se rompió una segunda, así que colocaron una estatua a juego del dios Magog. Cada uno de ellos va sobre un pedestal que tiene la misma forma y tamaño que una loseta cuadrada. Así que ya no son sesenta y cuatro cuadrados; ahora son... euh..."

"Sesenta y dos."

"Eso, justo. Y... ¿será número par?"

Roque se puso a contar con los dedos, pero se le agotaron enseguida. "La verdad, Abel, no tengo ni idea."

"Más nos valdrá que nos aseguremos antes de cincelar nuestros nombres en ningún contrato con validez legal, señor Roque. Porque hay cláusulas de penalización." Abel tuvo que esperar veinte minutos, mientras Cascarrocas maldecía a todos los condenados hijos de perra que habían inventado las cláusulas penalizadoras en los contratos municipales; en el ínterin tuvo ocasión de aprender setenta y tres palabrotas nuevas. "Son diez años en las minas de azufre si las losas nuevas no encajan", añadió, a modo de explicación. Las maldiciones cobraron nuevos bríos. Al cabo, Cascarrocas tuvo que pararse a cobrar aliento; Abel aprovechó el respiro. "Señor Roque, no vamos a poder resolver esto nosotros solos. Nos hace falta gente experta."

"¿Y sabes de alguien?"

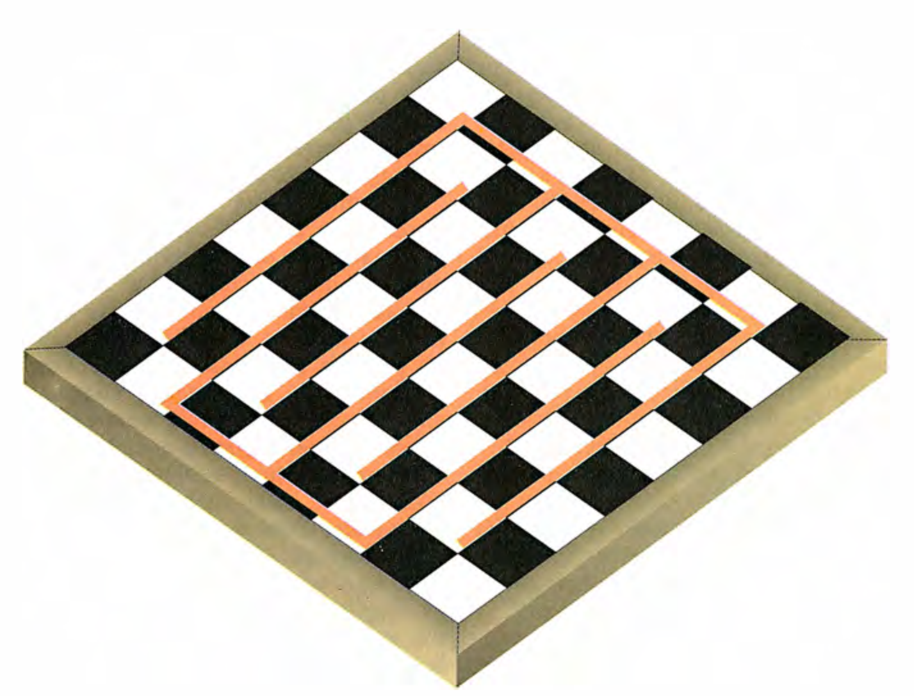
"Atchismisa."

"¡Salud y que los dioses te preserven de ser poseído por demonios!"

"¡Que no es un estornudo, jefe! ¡Es que se llama Atchismisa Güisquiatchís!"

"¡Ya has vuelto a... ! ¡Ya caigo, la chica ésa! La numerosofista amiga tuya que vive en la Gándara del Gato Muerto." Abel asintió con el gesto. "¡Eres espabilado! Sí, decididamente, nos hace falta una experta. Este asunto nos viene grande."

Atchismisa estaba cosiéndole a su túnica una orla de colas de topo cuando llegaron los canteros. Roque le explicó el problema y ella dejó escapar una risita irónica. "Menos mal que han tenido el buen juicio de consultarme. La cuestión ofrece aspectos que les pasarían inadvertidos a los legos, y se hubieran metido ustedes en problemas sin cuento. Para empezar, sesenta y dos es real y verdaderamente un número par ..." Se interrumpió mientras Roque y Abel porfiaban sobre quién había sido el primero en decirlo y quién había manifestado lo contrario. "... pero no basta con que el número de cuadrados sea par."



2. Las horquillas imbricadas de Ralph Gomory delimitan un circuito que se puede recubrir por dominós consecutivos.

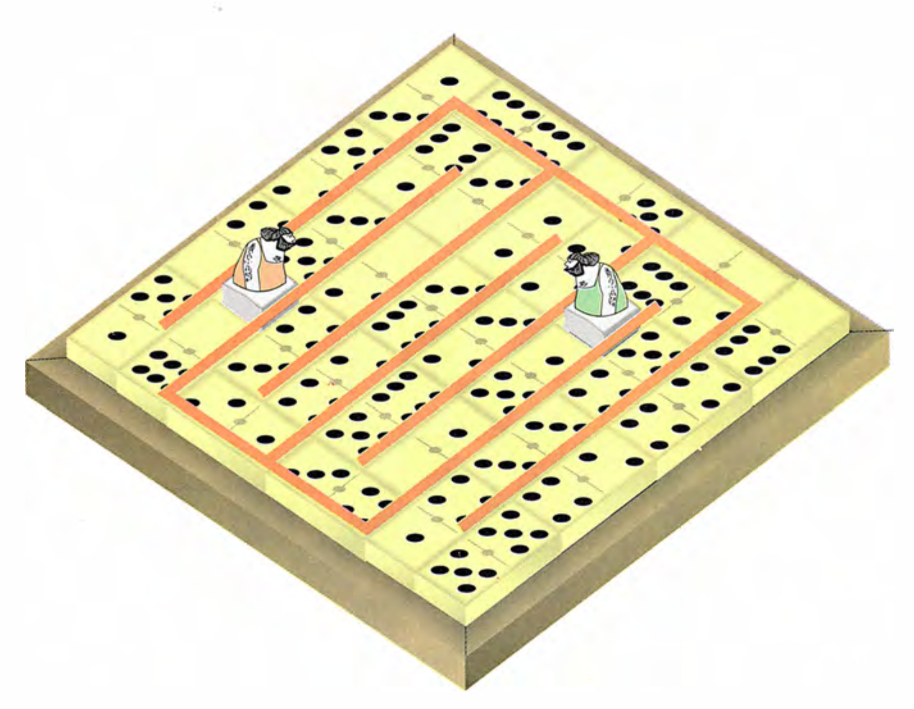
"¿Cómo es eso?"

"Hay un problema de paridad más profundo. Es un problema numerosófico muy gastado. Supongamos, por ejemplo, que se eliminan de la plaza los dos cuadrados diagonalmente opuestos (*véase la figura 1a*). ¿Creen ustedes que en ese caso será posible recubrirla con dominós?"

"A mí se me escapa", confesó Roque.

"Debería serlo", apuntó Abel. "Parece que hay sitio de sobra para tantear con distintas colocaciones y no hay cuadrados sueltos ni desemparejados."

Atchismisa revolvió en un rincón de su cabaña y sacó un tablero divi-



3. Pavimentación de un damero del que se han eliminado una casilla negra y una blanca.

dido en sesenta y cuatro cuadros, además de una caja con rectángulos de madera, cada uno del tamaño justo para cubrir dos cuadros contiguos. Colocó una piedrecita en dos vértices opuestos del tablero. "Prueba a ver."

Abel empezó a jugar con las piezas. Cascarrocas se acercó a Atchismisa y le preguntó para qué eran el tablero y las piezas de madera. "Era una idea que tuve para un juego", dijo la joven. "El tablero representa un río y hay que usar las piezas de madera para construir una especie de arco sobre él, que no se desplome. Había pensado llamarlo 'bridge'."

"Con un nombre así no creo que llegue a 'pegar'", opinó Roque.

Abel dio un manotazo sobre la mesa, de pura frustración. "¡No encajan! ¡He probado de docenas de formas, pero no quieren encajar!"

Atchismisa Güisquiatchís se sonrió. "Y no van a hacerlo, Abel. Permíteme que te haga notar que los cuadros son de dos colores" (*figura 1b*).

"Crean un motivo muy bonito."

"Pues sí. Yo lo llamo 'damero'."

"¿Y eso por qué?"

"Porque irá muy bien para ropa de señora.

"De todas formas, si te fijas, al colocar un dominó sobre el tablero verás que siempre cubre un cuadro blanco y uno negro, puesto que nunca hay dos cuadrados negros ni dos cuadrados blancos adyacentes. Abel: ¿cuántos cuadrados blancos hay, descontados los dos de las esquinas?"

Abel fue contándolos laboriosamente. "Treinta."

"Muy bien. ¿Y cuántos negros?"

"Vamos a ver.... treinta y dos."

"Exactamente. Dado que cada dominó recubre un cuadro de cada color, al menos dos cuadros negros habrán de quedar descubiertos. Tenías razón al decir que no iba a quedar un cuadrado suelto. ¡Pero eso no descarta que puedan quedar dos! Tenemos aquí un principio general de paridad para dominós: además de ser par el número total de cuadrados cubiertos, el número de cuadrados blancos y negros también ha de serlo."

"Absolutamente brillante", dijo Cascarrocas con sarcasmo. "Sólo que los cuadrados de Hipervilla son todos del mismo color." La fulminó con la mirada. "Típico de estas condenadas teóricas, sin el menor sentido práctico", dijo para sus adentros.

"Pero nada nos impide imaginar que los cuadrados estén coloreados. Y entonces el argumento es válido." Cascarrocas estuvo meditándolo unos minutos; al cabo, se sonrojó como un tomate. Para disimular su embarazo, despachó a Abel a Hipervilla, para que averiguase si las estatuas de Gog y Magog habían sido ubicadas o no en losas que, al imaginar la plaza escaqueada en blanco y negro, tuvieran el mismo color.

Transcurrieron otros dos días, durante los cuales Roque ayudó a Atchís a hacer sopa de ortigas suficiente para sobrevivir todo el invierno ella y su anciano padre. Por fin regresó Abel.

"¡Roque, lo tenemos en el bote! Una estatua está en losa blanca y la otra en losa negra."

"¿En cuáles?"

"¿Cómo que 'en cuáles'?"

"¿Dónde está Gog, en negra o en blanca?"

"Caray, Roque... no sé."

"Pues mira, Abel, podría tener importancia. Los sacerdotes de Gog llevan hábitos negros, mientras que los de Magog..."

"Pero, Roque, los colores de las losas son imaginarios. Si quieres, los imagino al contrario..."

Roque hizo una enérgica negación con la cabeza. "No es tan fácil, Abel. Acabo de recordar que en la cofradía de Magog llevan capuchas negras, mientras que los de Gog..."

"¡Por el amor de Bog!", se hartó Atchís. "¿Qué importancia tiene eso?" Sacudió a Abel por el hombro. "Por casualidad, ¿no recordarás las posiciones que ocupan las estatuas, verdad?"

"No."

"¡Pues qué bien!"

"¿Es que importa?", preguntó Roque.

"No estoy segura. Posiblemente. ¿Y si enviásemos otra vez a...? No; perderíamos días."

"Dos días", precisó Abel. "Y ya estoy hasta las narices de patear hasta el mercado de Hipervilla."

Atchís quedó pensativa. "Quizá no tenga importancia, ¿sabéis? Aunque, claro, tendríamos que tantear con un montón de posibilidades para estar seguros. Me parece que va siendo hora de consultar a mi padre."

"Su padre es taumaturgo", le recordó Abel a Roque. "Se pone en contacto con los espíritus y cosas así." Roque parecía escéptico, quizá porque siempre que la taumaturgia entraba en danza, a él le tocaba rascarse el bolsillo. Pero Atchís había salido ya a buscar a su padre. No tardó en reaparecer con un viejo. Debidamente incentivado con algunas monedas de la bolsa de Roque, el viejo pescó en la faltriquera unas cartas de tarot y empezó una adivinación.

"Abajo... la Luna. Arriba... la vaca saltarina. Al este y al oeste..."

"El gato y el violín", propuso Roque.

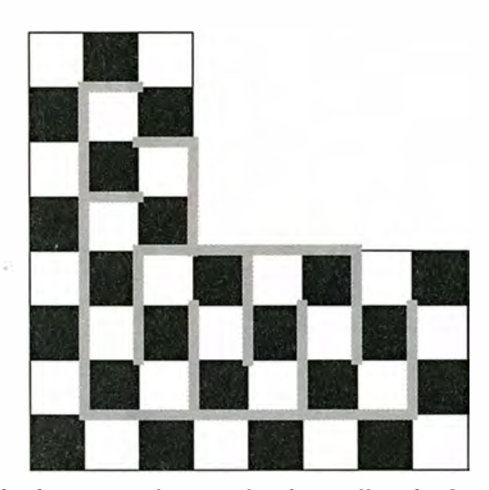
"Sí, pero el gato está cabeza abajo, lo que indica borrachera... Abajo, el perro canelo..."

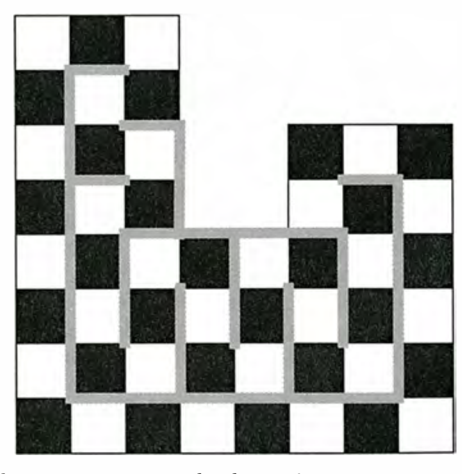
"Que significa que todo esto es puro camelo."

"... o sea, aprende ahora y paga luego. Más cartas... el plato... la cuchara..."

"Y el tenedor y el cuchillo."







4. Porciones de damero en las que las horquillas de Gomory delimitan circuitos de dominós.

"No... el dos de Horquillas." El viejo movió negativamente la cabeza. "Lo cual es muy extraño, porque no hay horquillas en la baraja... ¡Ah! un nombre... Un espíritu del futuro... un acólito del 'Gran Azul'... sicario de un gran ente místico... quizá tres letras: I, B, M... Ralph... Ralph..."

"Eso es el perro. Los perros están todo el día '¡Ralph! ¡Ralph!'."

"No, es un nombre de persona... Ralph... eeh... ¿Grimoire?... ¿Grimory? No, ya veo, es Ralph Gomory, numerosofista futuro de gran ingenio y originalidad... Un tridente y una horquilla de cuatro dientes... ¡Un signo cabalístico de gran poder! ¡Rápido, el tizón!" El viejo trazó rápidamente unas líneas sobre el tablero (*véase la figura 2*) y fue saliendo del trance.

Roque, de mala gana, soltó otra moneda de plata. Atchís olisqueó y estudió las líneas de tizne. "No estoy segura del todo, señor Cascarrocas. Imaginemos que las dos horquillas fuesen paredes. En tal caso se podría colocar entre ellas una línea de dominós, en un bucle sin fin. Si dos cuadrados están ocupados por estatuas, el bucle queda cortado en dos secciones, o puede que en una, si los cuadrados fuesen adyacentes. Si las estatuas se encuentran en cuadrados de distinto color, cada sección contiene un número par de cuadros, por lo que la cadena de dominós puede llenarla completamente. El diagrama supone una demostración de que sean cuales fueren los dos cuadros ocupados por las estatuas —sin más condición que ser de distinto color— los restantes podrán ser cubiertos por dominós. La verdad es que la prueba es constructiva, pues hace ver exactamente cómo lograr el resultado en un caso dado cualquiera" (*véase la figura 3*).

Roque estaba impresionado. "Atchís, te ruego que transmitas mis disculpas a tu padre. Nos ha descubierto una auténtica verdad." El anciano murmuró algo que sonaba a "predicar" seguido de algo sobre "dar trigo", y Roque le transfirió otra moneda de plata en evitación de futuros sonrojos. "Abel, trae mi cincel de escritura y una losa portátil de la mejor calidad. Vamos a titular el documento 'Presupuesto de renovación de la plaza del mercado de Hipervilla, presentado por Roque Cascarroca, Renovador Roquero'."

"Muy bien, jefe. ¡Anda!...", dijo Abel, "... me parece que no le he hablado de las dos estatuas nuevas. ¿O sí?"

Roque le hubiera fulminado. "¿Dos nuevas...?"

"Sí, a Demagog y a Pedagog. Los sacerdotes quisieron ocultar nuevas grietas."

"¡Ay, Gog mío!", exclamó Roque.

"Pero se encuentran en cuadrados de distinto color", añadió Abel, con buena voluntad. "Hay dos estatuas sobre cuadros blancos y dos sobre cuadros negros."

"Y por casualidad no recordarás donde están colocadas... No, claro. Oye, Atchís, ¿seguirá funcionando el razonamiento de Gomory cuando falten cuatro cuadrados, dos de cada color?"

Atchismisa frunció el ceño, concentrándose. "Funcionará si el orden de aparición de los cuadrados cuando se recorre el bucle de dominós es alternancia de blanco y negro", dijo la joven. "Pero si a un cuadro negro le sigue un cuadro negro, o a uno blanco otro blanco, el número de cuadros que median es impar y la demostración se viene abajo."

"¿Y podría suceder tal cosa?"

"No veo por qué no. Todo es bastante lioso."

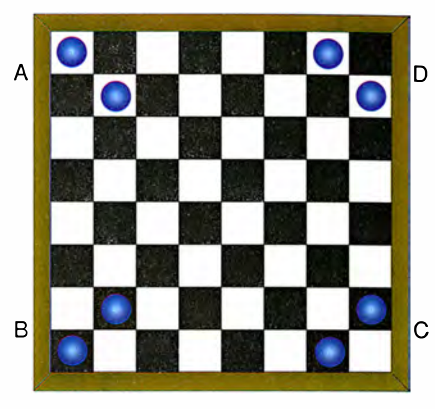
"En eso tienes razón." Se produjo una larga pausa. Roque empezó a decir algo, pero fue interrumpido.

"¡No, no, calla! Se me está ocurriendo una idea... Sí, claro. Cortemos el tablero en dos piezas, de manera que a cada una le falten precisamente dos cuadros, uno de cada color. Hagamos esto de forma que cada pieza pueda ser recubierta por un bucle sin fin de dominós, delimitado entre horquillas, y la demostración de Gomory seguirá siendo válida."

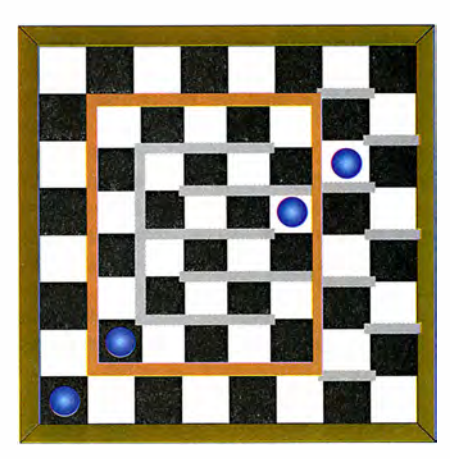
"¿Existirán tales descomposiciones?"

La joven reflexionó un momento. "Sí, y en abundancia. Voy a dibujar algunas (*véase la figura 4*). Bueno, no hay tiempo para entrar en detalles; pero estoy casi segura de que se puede demostrar que las únicas ocasiones en que tal descomposición del tablero resulta imposible se dan cuando o bien los dos cuadros negros omitidos, o los dos cuadros blancos, están en el mismo rincón (*véase la figura 5*). En una tal disposición, resulta obvio que el cuadrado del rincón está aislado de los demás y que no podrá encontrarse solución. En otro caso... es posible dividir otra vez el tablero en dos regiones, a cada una de las cuales le falte exactamente un cuadrado de cada color, y cada región posee una configuración de Gomory propia (*véase la figura 6*). Una de las regiones ha de tener un hueco en su interior, pero eso no altera el argumento. Estoy convencida de que un análisis cuidadoso mostraría que siempre es posible recubrir el tablero con dominós, salvo cuando en un vértice se dé, para uno u otro color, una configuración como la de la figura 5." La moza hizo un gesto de resignación. "La demostración, sin embargo, no es tan elegante como la de Gomory. Tal vez algún futuro numerosofista consiga hacerlo mejor."

"Sea como fuere", dijo Roque, "puede que volvamos a tener trabajo".



5. Cuatro disposiciones problemáticas en los vértices. C y D impiden la colocación de un dominó que cubra el cuadrado del vértice; en cambio, las A y B lo permiten.



6. Una posible forma de tratar el caso A de la figura 5. A cada una de las regiones definidas por las horquillas le falta exactamente un cuadro de cada color.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATHEMATICAL RECREATIONS. Maurice Kraitchik. Allen and Unwin, Londres, 1943.

MATHEMATICAL PUZZLES AND DIVERSIONS FROM SCIENTIFIC AMERICAN. Martin Gardner. Bell, Londres, 1961.

MATHEMATICAL GEMS I. Russ Honsberger. Dolciani Mathematical Expositions n.º 1, Mathematical Association of America, 1973.

Libros

Fernando Muñoz Box, Antonio Prevosti y Santiago Mas-Coma

Cronología

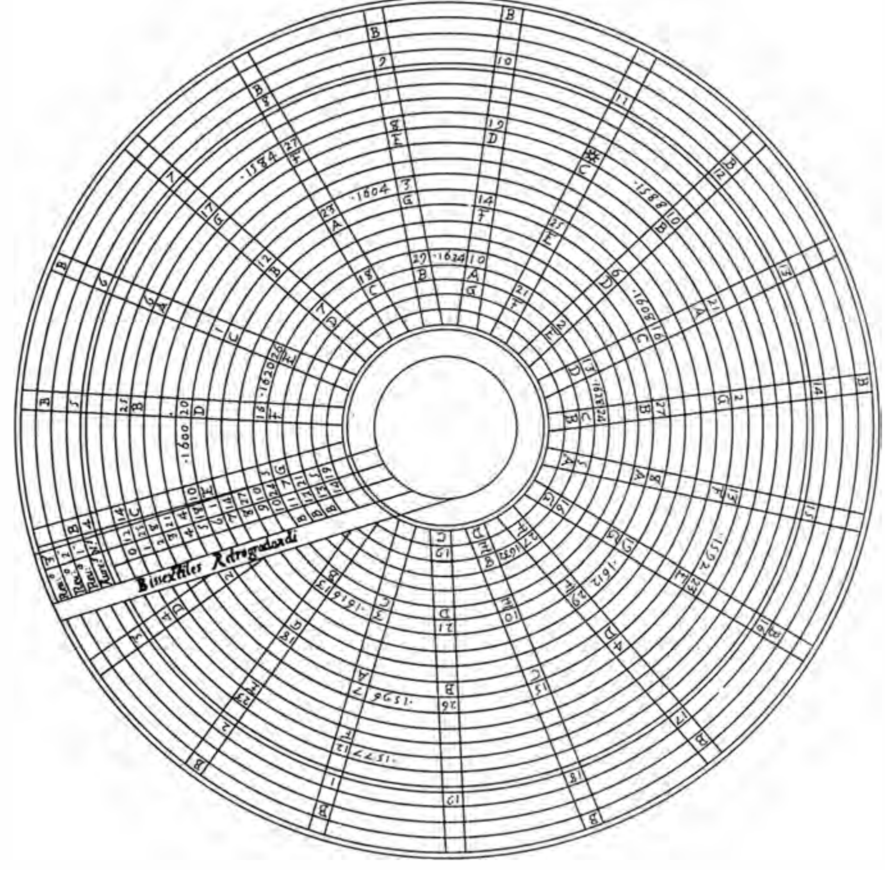
Informe pericial

BREVE DISCURSO A SU MAJESTAD EL REY CATOLICO EN TORNO A LA REDUCCION DEL AÑO Y REFORMA DEL CALENDARIO, por Juanelo Turriano. Fundación Juanelo Turriano. Editorial Castalia. Madrid, 1990.

Nos encontramos ante la edición, cuidada en el aspecto externo, de un texto al parecer inédito hasta la fecha, aunque no desconocido de los eruditos, que se encuentra en la Biblioteca Vaticana. Su título no es sólo el ya largo del encabezamiento, sino que añade: *Con la explicación de los instrumentos inventados para enseñar su uso en la práctica.*

Al hacer un enjuiciamiento crítico, la oportunidad o conveniencia de sacar a la luz este texto se presenta como primer punto a considerar. Es probable que una de las finalidades de esta Fundación sea dar a conocer todo lo referente a este importante autor del siglo XVI. Pero a quienes echamos de menos una rememoración de la Reforma Gregoriana al cumplirse su cuarto centenario en octubre de 1982, ignorado por todos los medios de comunicación y tenido en cuenta sólo por algunas revistas científicas, el libro nos parece ligeramente extemporáneo.

Es sabido que la celebración, obligada por el Concilio de Nicea, del equinoccio de primavera en la fecha de 21 de marzo había tenido la consecuencia de separar sensiblemente el equinoccio astronómico (es decir, el momento de la llegada del Sol al nodo de la eclíptica llamado punto vernal) y, por tanto, el comienzo de la primavera astronómica de la fecha oficial. Desajuste que en el siglo XVI llegaba a suponer diez días naturales. Ello tenía además la secuela de haber desajustado también la correcta celebración de la Pascua de Resurrección, que Nicea había determinado fuese el primer domingo después del plenilunio de primavera, siempre que no coincidiese con la Pascua judía, en cuyo caso debería posponerse un domingo más.



Reconstrucción de una de las tablas de Juanelo Turriano.

Gregorio XIII había afrontado el problema, como habían hecho algunos de sus antecesores, y decidido una reforma tras el asesoramiento de importantes astrónomos de la época, entre quienes resalta Aloysius Lilio. Pero queriendo el Papa conocer el parecer de los Príncipes de la Cristiandad, y en particular del poderoso Felipe II, éste requiere la opinión, entre otros muchos, del ingeniero Juanelo Turriano, quien contesta en italiano a Su Majestad con el discurso que aquí se presenta, tanto en el idioma original como bien traducido al nuestro.

La explicación de Juanelo Turriano está concebida en principio como una justificación de la necesidad de la reforma propuesta. Es interesante resaltar su opinión de que el ajuste podría hacerse suprimiendo bien diez días del calendario, como así se hizo después, o bien los siguientes diez años bisiestos, lo que habría prolongado la reforma durante cuarenta años.

En segundo lugar explicita que el ajuste solar debería ir acompañado del correspondiente ajuste de la fecha de los novilunios, lo cual tenía que llevar a una reforma en el ciclo de las epactas. Epacta de cada año no es más que un número, comprendido entre 1 y 30, que indica la edad de la luna al comenzar ese año, es decir, los días transcurridos desde el novilunio. En el antiguo calendario juliano, los novilunios sólo podían tener lugar en determinados días, ya que, según Metón, verificaban un ciclo completo cada diecinueve años. Por ello a cada año se le asignaba un número entre 1 y 19, que se llamó número áureo por venir escrito en caracteres dorados. En el calendario juliano todos los años con el mismo número áureo tienen sus novilunios en las mismas fechas. Sin embargo, algunos autores utilizaron ya el cómputo de las epactas, que en este calendario quedaba perfectamente determinado. Pero al no ser exacto el ciclo de Metón, se exigía una co-

rrección de las tablas de las epactas. Fue el jesuita Clavio (que, por cierto, no fue obispo, a pesar de que así se afirma en el libro que comentamos) quien elaboró las complicadas, y entonces muy criticadas, tablas de epactas que sirvieron para la reforma gregoriana.

Juanelo Turriano añade en el documento sus propias tablas de epactas, incorrectas en cierto modo, e insuficientemente explicadas para conseguir saber la correspondiente a un año concreto. Sólo encontramos correcta la última tabla, referente a los distintos meses, que sirve, una vez conocida la epacta de un año, para saber la fecha eclesiástica oficial del novilunio en dicho mes. Aunque tenemos que añadir que no es más que un calendario al estilo de los que la propia Iglesia editaba en sus misales y breviarios, en los que se indicaban la epacta y la letra dominical, necesarias cuando de localizar la fecha de la Pascua se trataba.

Para las primeras tablas sostiene Juanelo que el ciclo de las epactas cambia cada 304 años, resultado de multiplicar 19 por 16, que es como una corrección de segundo orden al ciclo de Metón. Sin embargo, esta tabla no nos permite conocer el número áureo de un año concreto, por ejemplo el de éste en que nos hallamos ni, por tanto, localizar con exactitud la epacta que se utiliza en la última tabla para saber la fecha de los novilunios. En concreto, este año de 1992 tiene como número áureo el 17, que en una correcta tabla de epactas nos daría el 25. No sucede tal en las tablas de Juanelo Turriano. Pero si tomamos dicha epacta 25 y vamos a la última tabla veremos que, en efecto, el novilunio de abril fue el día 4 y, por tanto, el domingo siguiente al plenilunio del 18 es la Pascua, que este año fue ciertamente el 19 de abril, día en el que está la letra dominical señalada para este año bisiesto.

De los instrumentos prometidos en el largo título, Turriano no hace sino aportar unos artilugios circulares de papel que, girándolos, habían de facilitar los cálculos. Son, en suma, una manera distinta de presentar unas tablas de doble entrada para conocer la epacta de un cierto año. La reproducción que aquí se nos da de ellos resulta muy insatisfactoria, al no consistir más que en un mero dibujo, en el que se solapan los planos.

En cuanto a la introducción de J. A. García de Diego, no tenemos mucho que decir, sino que es característica de su estilo y personalidad. Sí quisiéramos comentar el análisis que aporta J. M. González Aboin. Comienza hablando del tiempo y su medida, con algunas imprecisiones en cuanto a la definición exacta de día sidéreo o a no indicar que lo que se afirma de la posición del Sol en la esfera celeste se refiere a nuestras latitudes. Nos habla después brevemente del calendario juliano y de la necesidad de la reforma. A continuación explica la aportación de Juanelo. Echamos de menos en su análisis una crítica de la misma, como la que acabamos de presentar; por otro lado, creemos que no hubiese sido superfluo definir correctamente las epactas, para utilidad del lector, y analizar con más profundidad la necesidad de corregir las fundamentadas en el calendario juliano y en el ciclo de Metón. Un último apartado se refiere a la aceptación del calendario gregoriano; su contenido es bastante conocido por los interesados en estos temas. (F. M. B.)

Genética molecular

Compendio al día

MANUAL DE GENETICA MOLECULAR. J. León Serrano, y J. M. García Lobo. Editorial Síntesis, S. A., Madrid, 1990.

La publicación de un original en español de genética molecular siempre es una buena noticia, sobre todo si su contenido es correcto, como en el presente caso. Se trata de una disciplina en la que los nuevos conocimientos se acumulan rápidamente, por lo que una obra original suele estar mucho más al día que los libros traducidos, dado el desfase de tres o cuatro años que habitualmente las separa.

Como indican los autores en el prólogo, este libro trata sólo de los procesos más básicos de la genética molecular, es decir, de los que afectan a la estructura, perpetuación y expresión de los genomas. Está dirigido a estudiantes con los conocimientos previos correspondientes a un curso de genética general, por lo que no se tratan en él los temas elementales. Así, por ejemplo, se explican directamente los aspectos estructurales del ADN y de las proteínas que son relevantes para su interacción, pero no las características estructurales más generales de aquél ni de éstas.

Una gran parte de los conocimientos compendiados en este reducido, pero compacto, volumen se han obtenido utilizando las técnicas de manipulación del ADN que, además de sus aplicaciones a la ingeniería genética, se han convertido en un instrumento indispensable para la investigación básica en genética molecular. Por ello, un complemento muy adecuado a la presentación de los resultados más recientes obtenidos en este campo es acompañarla de los fundamentos de tales técnicas; además de constituir una información interesante sobre el progreso general de la genética, sirve para apreciar el justo valor de estos resultados. León Serrano y García Lobo lo hacen así, siguiendo la pauta marcada por muchas otras obras publicadas en los últimos años. Dedican a ello el primer capítulo del libro que nos ocupa, que también incluye la descripción de las principales características de elementos genéticos presentes en las bacterias, como los plásmidos y los bacteriófagos, muy utilizados como vectores para introducir material genético foráneo en las células manipuladas.

Debido a las diferencias estructurales y funcionales existentes entre los genomas de los organismos procariotas y los de los eucariotas, ambos niveles de organización celular se estudian por separado. De los procariotas se ocupan el capítulo segundo (estructura y replicación del genoma, mecanismos de mutación, reparación, recombinación y transposición) y el tercero (expresión génica y su regulación). Por lo que se refiere a los eucariotas, el capítulo cuarto describe la estructura, replicación y transposición de su genoma, así como la estructura de los cromosomas; el capítulo quinto analiza la expresión de los genes eucarióticos y el sexto su regulación. El libro no incluye un estudio del material genético extracromosómico presente en las células de los organismos superiores (mitocondrias y plastos). Prácticamente tampoco se consideran los virus que los afectan, si se exceptúan algunas referencias concretas, como la que se hace al virus SV40 cuando se trata de la replicación del material genético.

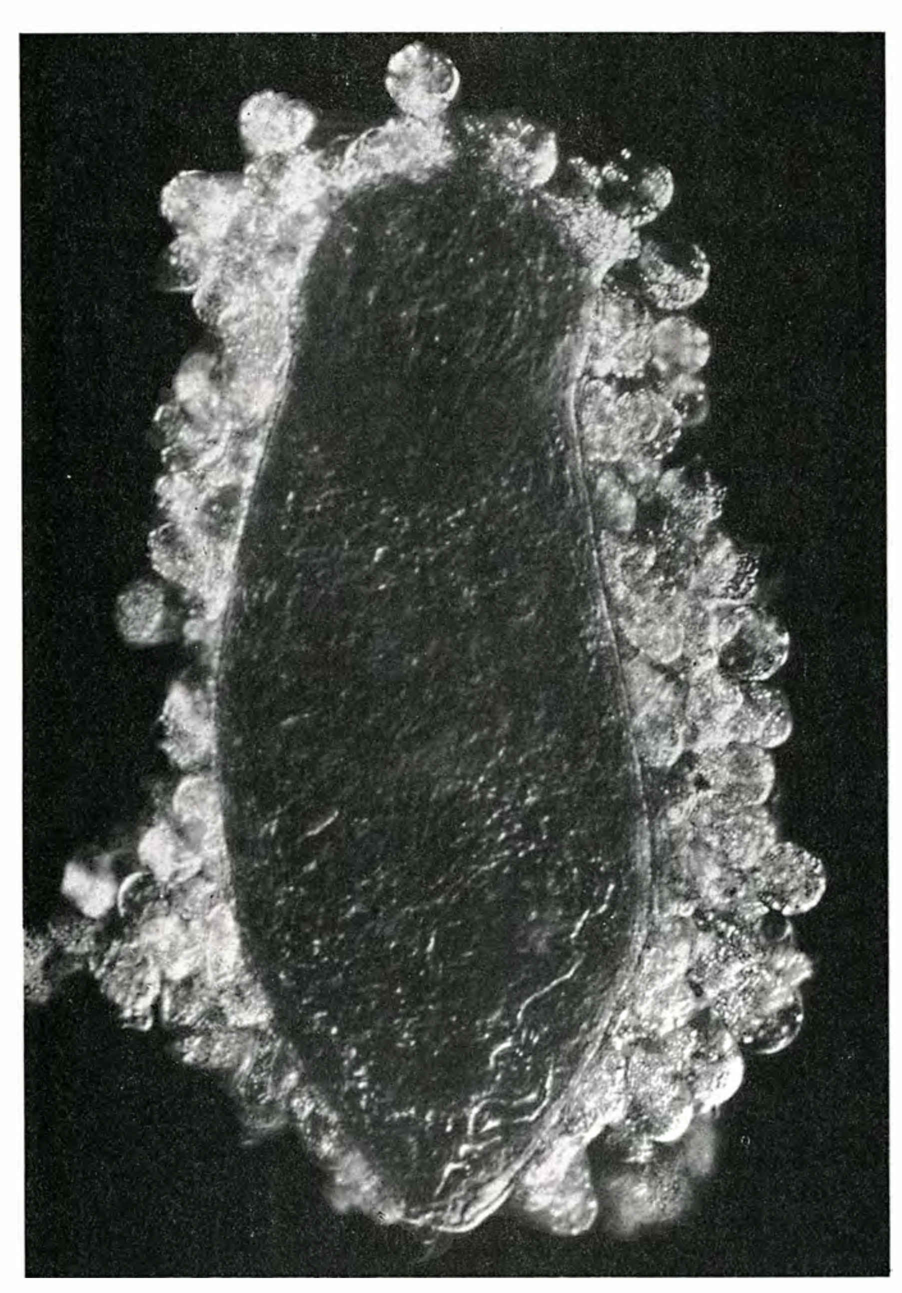
La cantidad de información ofrecida en este volumen es considerable y, aunque presentada de manera algo densa, se expone con claridad. Es, por tanto, un libro indicado para estudiantes y cualquier otra persona con unos conocimientos básicos. El nivel corresponde al de estudiantes de genética molecular en el segundo ciclo universitario y es a ellos a quienes se dirige principalmente. De modo esporádico podrá ser útil para estudiantes de tercer ciclo, si bien el contenido de tales cursos suele ser más especializado. (A.P.)

Parasitología

Enemigos poderosos

MODERN PARASITE BIOLOGY. CELLULAR, IMMUNOLOGICAL, AND MOLECULAR ASPECTS; editado por David J. Wyler. W. H. Freeman and Company, Nueva York, 1990.

Como tantas otras disciplinas, la parasitología ha experimentado en los últimos años desarrollos y cambios profundos. Dos han sido las causas fundamentales de esta evolución. Por un lado, la aplicación de nuevas y refinadas técnicas procedentes de otras áreas de la biología ha permitido la obtención copiosa de importantes conocimientos sobre los parásitos. Pero también la necesidad ha influido en ello. La batalla o, mejor dicho, las batallas contra las enfermedades provocadas por estos seres en la especie humana y los animales domésticos presentan ahora perspectivas menos optimistas que en el pasado reciente. La dos enfermedades más importantes que aquejan actualmente a la humanidad (la malaria o paludismo y la esquistosomiasis o bilharziasis) aumentan su poderío en lugar de reducirlo: la malaria por la proliferación de cepas resistentes a los productos quimioterápicos habituales; la bilharziasis por el surgimiento de nuevos focos de endemia debidos a las modificaciones humanas del medio ambiente. Y en la misma dirección actúa su asociación oportunista con otras dolencias: diversos estudios han venido a demostrar que los parásitos son los causantes de hasta el cincuenta por ciento de las muertes en pacientes inmunodeficientes, como los afectados por virus VIH, productores del sida.



Eosinófilos humanos adheridos a un esquistosoma joven cubierto de anticuerpos. La reacción produce la muerte del organismo en un período de 24 a 48 horas.

La obra que nos ocupa tiene el interés de abordar ambos aspectos. Por un lado, trata cuestiones de biología celular, de inmunología y de biología molecular, tres ciencias cuyos métodos y técnicas de estudio han permitido ahondar muy significativamente en el conocimiento de la interacción existente entre parásito y hospedador. Por otro, versa de modo concreto sobre aquellas especies de parásitos causantes de las enfermedades humanas más importantes, como son las de *Plasmodium* (paludismo), *Toxoplasma gondii* (toxoplasmosis), las especies (o subespecies) africanas de *Trypanosoma* (tripanosomiasis africana o enfermedad del sueño), *Trypanosoma (Schizotrypanum) cruzi* (tripanosomiasis americana o enfermedad de Chagas), las del género *Leishmania* (leishmaniasis), las de *Schistosoma* (esquistosomiasis), de *Wuchereria* y *Brugia* (filariasis linfáticas) y la *Entamoeba histolytica* (amebiasis y disentería amebiana).

El libro es el resultado de la colaboración entre destacados especialistas, coordinados por Wyler. Está organizado en tres partes, cada una de las cuales consta de una introducción genérica del editor seguida de diferentes capítulos.

La primera, biología molecular, trata sucesivamente de *Plasmodium* (M. E. Perkins), *Toxoplasma gondii* (E. R. Pfefferkorn), tripanosomas africanos (M. J. Turner y J. E. Donelson), *Trypanosoma cruzi* (M. E. A. Pereira), *Leishmania* (K.-P. Chang), ultraestructura y transformaciones de *Schistosoma* (P. F. Basch y J. Samuelson), membranas tegumentarias de *Schistosoma* y sus interacciones con las células sanguíneas humanas (J.P. Caulfield) y *Entamoeba histolytica* (J. I. Ravdin).

La segunda parte, inmunología, trata de malaria (D. J. Wyler), toxoplasmosis (S. D. Sharma), leishmaniasis (M. E. Wilson y R. D. Pearson), tripanosomiasis africana (J. M. Mansfield), enfermedad de Chagas (Z. Brener y A. U. Krettli), esquistosomiasis (A. E. Butterworth) y filariasis linfáticas (W. F. Piessens, J. A. Fuhrman y A. C. Vickery).

Por último, la tercera parte, biología molecular, no incluye más que cuatro capítulos, referentes a *Plasmodium* (T. F. McCutchan), tripanosomas (J. C. Boothroyd), *Leishmania* (D. F. Wirth) y uno último que aborda esquistosomas y filarias de manera conjunta (G. R. Newport y N. Agabian). La obra concluye con una bibliografía de referencias primarias y un índice de materias.

Puede que sea ya en la selección de parásitos donde quepa efectuar los primeros reparos; se echan en falta algunos parásitos humanos muy importantes, sobre los cuales se han realizado además destacables avances en los últimos tiempos y precisamente en aspectos celulares, inmunológicos y moleculares. Resulta difícil entender que no se haya incluido en la obra a la especie *Echinococcus granulosus* (productora de hidatidosis unilocular en el ser humano), las especies (o subespecies) de *Trichinella* (triquinosis) y finalmente, cómo no, *Onchocerca volvulus* (oncocercosis), por sólo citar unos pocos.

Sorpresa diferente es la causada por la falta de uniformidad del enfoque. En efecto, no todas las especies de parásitos consideradas se abordan en las tres vertientes establecidas. Así, no hay un capítulo de biología celular de filarias o de biología molecular de *Toxoplasma* ni de *Entamoeba histolytica*. En ciertos casos, se engloban distintos aspectos de un mismo parásito (la biología celular de esta última y la inmunología de la amebiasis se consideran conjuntamente en el capítulo octavo) mientras que, en otros, se analiza un único aspecto de parásitos distintos (biología molecular conjunta de esquistosomas y filarias en el decimonoveno).

La discutible estructuración del libro se observa también en la bibliografía. Al final de cada capítulo se incluye una breve lista de referencias bajo el rótulo de "lecturas adicionales", mientras que las referencias básicas hay que ir a buscarlas al final del libro, a pesar de lo cual allí se sigue manteniendo la organización por capítulos, más bien inconveniente. Falta una lista de las abreviaturas utilizadas, lo que hubiese sido muy útil, y la nomenclatura adolece de falta de uniformidad y hasta de inconsistencia, como en el caso de los tamaños de proteínas, en que se utilizan formas tan dispares como "kD", "-kD", "D", "daltons", "M_r" e incluso "M_r - kD", sin olvidar que, al menos en un caso, "kD" se usa como abreviatura de constante de disociación.

Hay una especie de indefinición en cuanto a la naturaleza de la obra. Mientras que la multiplicidad de autores y el nivel de los conocimientos hacen pensar en una compilación de revisiones por especialistas de los tres aspectos mencionados de los parásitos seleccionados, el tratamiento no exhaustivo y el hecho de que en el texto no se haga nunca referencia a bibliografía alguna, ni siquiera a las incluidas en las listas de fuentes de información primaria de cada capítulo, sugieren un enfoque de libro de texto. Quizás esto sirva para explicar la clara insuficiencia bibliográfica, que omite importantes trabajos recientes, disponibles al elaborarse éste, algunos de ellos revisiones en el sentido preciso del término.

Analicemos el contenido. Los capítulos de la primera parte consideran el ciclo vital y la morfología de cada uno de los parásitos, extendiéndose luego sobre aspectos concretos de su biología celular, salvo en el caso del esquistosoma. Se observan lagunas importantes, como que no haya mención alguna del estadio hepático de hipnozoito en especies como *Plasmodium cynamolgi*, *Plasmodium vivax* y *Plasmodium ovale*, curioso estado de latencia que plantea varios enigmas desde los tres puntos de vista analizados en la obra, sin olvidar su papel trascendental como disparador de los procesos causantes de las verdaderas recidivas (que no recrudescencias) de la malaria por dichas especies.

También resultan insuficientes las escasas líneas dedicadas a la novedad más destacable detectada en el ciclo biológico de las especies humanas de esquistosoma: la capacidad de reconversión de los estados larvarios de esporocisto a nivel de molusco hospedador intermediario, proceso muy interesante, que presenta distintas modalidades según las especies, por el cual, a partir de los esporocistos de segunda generación, estos estados larvarios adquieren una capacidad bipotencial de actuar como cercariógenos y esporocistógenos. En ambos casos existe una larga bibliografía aparecida en revistas de especialidad e incluso en obras monográficas, sin que se mencione una sola de ellas en el libro.

Son destacables en esta primera parte las buenas contribuciones de Pfefferkorn en sus análisis bioquímico y genético de la interacción entre *Toxoplasma gondii* y su célula hospedadora; de Perkins, que ilustra el considerable vacío existente en los conocimientos sobre la base bioquímica de la invasión del hematíe (varias de las proteínas del parásito que pueden estar involucradas se han descrito meramente como antígenos y es un hecho evidente que los avances de los estudios funcionales de estas moléculas constituyen una labor harto dificultosa); y de Turner y Donelson, que se centran en la síntesis, función y estructura de la glicoproteína de superficie variable de *Tripanosoma brucei* (se describe también la única organela de tripanosoma, el glicosoma, pero de modo sucinto).

Los de la segunda parte, correspondiente a inmunología, argumentan en esencia sobre mecanismos, regulación y patología de los efectores inmunitarios, seguidos por descripciones de algunos antígenos y proyectos de desarrollo de vacunas. Su contenido varía considerablemente. Así, mientras Wyler proporciona una revisión equilibrada de los estudios sobre inmunología de malaria, usualmente conflictivos, otros son más detallados, como el de Mansfield sobre tripanosomiasis africana.

Ya en la parte de biología molecular, el escrito de McCutchan sobre *Plasmodium* se ocupa primordialmente de trabajos antiguos sobre clonaje de genes antigénicos, con énfasis en vacunas y antígenos. Aquí hubiese resultado útil la referencia a estudios más fundamentales sobre cuestiones de genética y organización cromosómica. Boothroyd y Wirth, en sus respectivos capítulos sobre *Trypanosoma* y *Leishmania*, remiten a varios descubrimientos de interés e incluso describen algunos de ellos, como la variación antigénica, ARN mensajero, ARN mitocondrial y ADN kinetoplástido.

Mencionemos la ausencia, por otro lado inevitable, de discusiones sobre la utilización de métodos y técnicas de base inmunológica y de ADN en el diagnóstico de las enfermedades, o de genética molecular en la dilucidación de la base de la resistencia a quimioterápicos, casos ambos de aplicaciones recientes del máximo interés.

A pesar de las objeciones apuntadas, se trata de una obra interesante sobre aspectos de actualidad en parasitología, recomendable sobre todo para científicos con una base sólida en los campos en cuestión, a quienes proporcionará una visión general de los mismos, y para quienes investiguen sobre ellos. Entendemos que es un libro que debería estar en las bibliotecas de todos aquellos centros en los que se trabaje sobre estas líneas. (S. M.-C.)

Apuntes

Conflicto de culturas. Hasta ahora, el múltiplo 'billón', unidad no estándar, pero usual en un mundo dado al gigantismo y la inflación, equivalía a un millón de millones, salvo en Estados Unidos y países de influencia, donde un billón son mil millones. La importante magnitud de esta discrepancia ha sido, y es, fuente de errores sin cuento y pesadilla de editores responsables. Nada menos que la revista *Nature* acaba de claudicar ante el uso norteamericano y, por ende, preponderante, declarando con solemnidad que "... a partir de ahora, la palabra inglesa 'billón' tendrá el significado de 10^9 y no el de 10^{12}." Puede que así se aclaren las cosas y sepamos a qué atenernos cuando el término se use en inglés, pero mucho nos tememos que con esto no termine la confusión.

Hace unos meses, dos botánicos de la Universidad de Toronto y un ingeniero de montes de la Universidad Técnica de Michigan publicaron su descubrimiento de un hongo sin par en el reino de la vida, con sus más de 10.000 kilogramos y una extensión de 15 hectáreas. También se le suponía el más antiguo de los organismos vivos, con 1500 años. A la especie, *Armillaria bulbosa*, le ha salido un duro contrincante congénere, *Armillaria ostoyae*, con un ejemplar que vive en un cerro de Mount Adams, estado de Washington. Este segundo centuplica la superficie cubierta por el primero, aunque es mucho más joven y más agresivo con el tapiz forestal. Y se dice que en Oregon podría haber un tercero de no menos espectaculares medidas.

"Eramos pocos y parió la abuela", piensan muchos miembros de la comunidad científica norteamericana ante la orden que el Congreso de su país dio recientemente a los National Health Institutes para que dediquen dos millones de dólares anuales de su presupuesto a evaluar terapias heterodoxas para el tratamiento de enfermedades. Aparte del mordisco económico, se sienten dolidos por la ingerencia política. Pocos creen, además, en su utilidad, tanto por lo improbable de llegar a posiciones confirmatorias claras como por la habitual impermeabilidad de quienes siguen estos enfoques ante los resultados negativos.

Las misteriosas líneas de Nazca, en la zona costera sur de Perú, han sufrido otro nuevo intento de fijar su antigüedad, ya que no de aclarar su sentido. Dorn y Clarkson han datado la pátina de las piedras que bordean las líneas, cuya ordenación las crea precisamente, dejando al descubierto materiales más claros del fondo. Su margen de fechas para la pátina es entre 190 a.C. y 600 d.C., muy en coincidencia con otros métodos indirectos previos.

Los zoólogos piensan que quién deba cortejar depende de la proporción que haya entre machos y hembras disponibles, si bien, en general, serán cortejados los individuos del sexo que invierta más energía en la reproducción. Los machos suelen hacerlo menos y, en consecuencia, se ven sometidos a la elección de hembras caprichosas. La idea se ha comprobado experimentalmente con una especie de grillos, cuyos machos juegan un papel importante en la aportación de nutrientes por lo que, cuando el alimento escasea, son las hembras quienes se ven obligadas a buscar los favores de machos exigentes.

Sabido es que, hasta tiempos recientes, no bastaba con tener una buena idea que experimentar; había también que construirse el instrumental necesario. Galileo y Newton tuvieron que diseñar y montar sus propios telescopios para observar el cielo. El primero usó para los suyos, en algún caso, lentes compradas, pero pulió otras él mismo. Se conserva la lente que le sirvió para el descubrimiento de las estrellas Mediceas (los satélites de Júpiter) y sobre ella no hay duda de la autoría de Galileo. Pues bien, la mano no le funcionaba peor que la cabeza. Sometida a los bancos de pruebas ópticas actuales, muestra una perfección inmejorable, salvo la natural aberración cromática. No le van muy en zaga las demás lentes conservadas, aunque fuesen de otros artesanos.

Creían los renacentistas, apoyándose en textos de la antigüedad clásica, que los egipcios y otros pueblos embalsamaban a sus muertos con betún. Más tarde se puso en cuestión tal aserto. La investigación parece devolverles la razón a Belon, entre los renacentistas, y a Diodoro, entre los antiguos. El "asfalto" se empleó de forma generalizada en la momificación egipcia. El término "momia" procede del iraní "mumia", que significa betún y se extraía de la montaña persa de la Momia. Con técnicas propias de la química de hidrocarburos, se han identificado "fósiles" químicos (esteranos y terpanos) en muestras de los embalsamados.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



DINAMICA DEL VOLCAN KILAUEA, por John J. Dvorak, Carl Johnson y Robert I. Tilling

El Kilauea es uno de los volcanes más estudiados del mundo. Este examen ayuda a comprender el comportamiento de otros volcanes y a predecir futuras erupciones destructoras.

ENDOTOXINAS BACTERIANAS, por Ernst Theodor Rietschel y Helmut Brade

Son parte integrante de muchas bacterias y resultan a un tiempo beneficiosas y dañinas para el ser humano. Se trabaja para neutralizar sus efectos perjudiciales y sacar partido de los provechosos.

LA CONVERSION DE LA COSMOLOGIA EN CIENCIA, por Stephen G. Brush

El descubrimiento del fondo cósmico de microondas en 1964 estableció la teoría de la gran explosión ("big bang") y convirtió la cosmología en una ciencia empírica.

RATAS TOPO DESNUDAS, por Paul W. Sherman, Jennifer U. M. Jarvis y Stanton H. Braude

La mayoría de estos roedores coloniales son obreros no reproductores que atienden a una hembra fértil. En este aspecto, su estructura social se parece mucho a la de algunos insectos.

DE VUELTA A LA VIDA, por Ian Tattersall

Los paleontólogos están acostumbrados a interpretar la evolución a partir de huesos y dientes aislados. Cuando intentan reconstruir el cuerpo entero se encuentran con muchos problemas.

PARADOJAS DEL TONO MUSICAL, Diana Deutsch

Ciertas series de sonidos producen la impresión de un ascenso o descenso infinitos de altura tonal. Otras estructuras cambian al transponerse de clave, señalando la influencia del habla sobre la percepción músical.

INTIMIDAD ELECTRONICA, por David Chaum

Una invención criptográfica conocida por "firma ciega" permite que se utilicen números como moneda electrónica o sustituyan a la identificación personal. El autor abriga la esperanza de que tal invento logre devolver al individuo el control de la información personal que le concierne.

BOMBA DE PROTONES DE LA MEMBRANA VEGETAL, por Ramón Serrano y José Manuel Villalba

Las células de plantas y hongos contienen en su membrana plasmática una ATPasa que opera como bomba de protones. La enzima desempeña un papel crucial en la regulación de la concentración de protones y en el transporte de otros iones.

